

Fig. 3. Descomposición de una función periódica.

tró en resonancia.

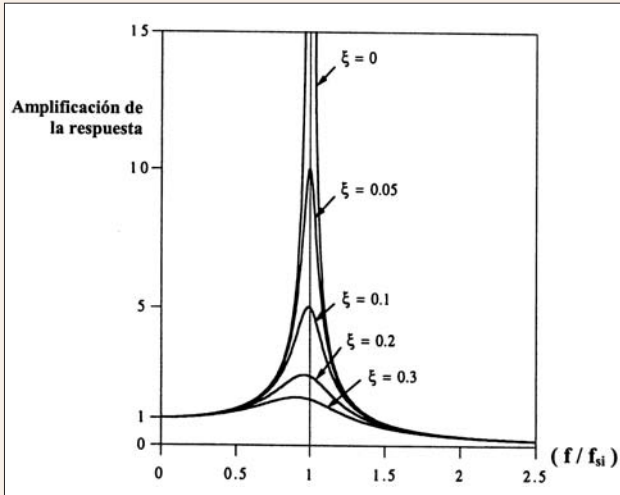


Fig. 4. Amplificación de la respuesta de una estructura en función de la frecuencia de la acción variable exterior.

Cuando se da esta situación, se dice que dicha estructura ha entrado en resonancia.

Pues bien, en la figura 5 se muestra una función – densidad espectral – dependiente de $(v_v)^2$, representativa de un caso típico real y se observa que las frecuencias más características del viento incidente se en-

Esta función periódica se puede descomponer en varias funciones sinusoidales de amplitud variable, de período T_1 y sus múltiplos, y representarla en el dominio de la frecuencia, tal como muestra la figura 3.

Pues bien, si el valor inverso de T_1 , denominado frecuencia f_1 , o uno de sus primeros múltiplos, llamados armónicos (Fig. 3) es muy similar a alguna de las frecuencias f_{si} correspondiente a una de las formas de vibración propias de la estructura, dicha forma o modo de vibración aumenta considerablemente su amplitud; es decir, se produce un efecto de amplificación de la respuesta de la estructura ante la acción exterior periódica (Fig. 4), que también depende del amortiguamiento estructural, ξ .

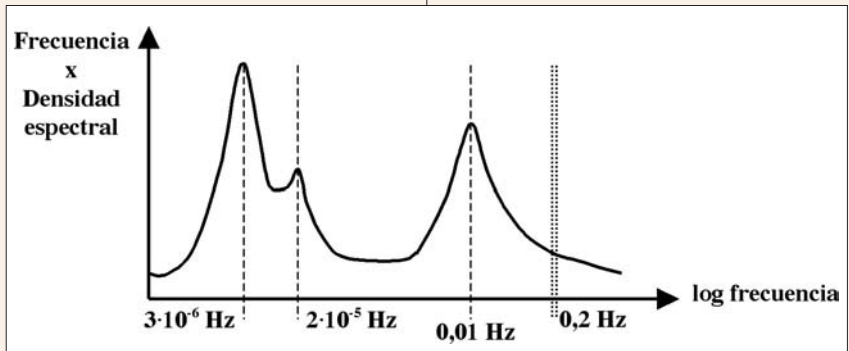


Fig. 5. Curva típica de variación con la frecuencia del producto de la frecuencia por la función de densidad espectral [basado en Meseguer et al., 2001].

cuentran a 0,01 Hz, $2 \cdot 10^{-5}$ Hz y $3 \cdot 10^{-6}$ Hz aproximadamente, valores muy lejanos al entorno de los 0,2 Hz (12 - 14 vibraciones/minuto) a los que estaba oscilando el puente cuando se produjo su colapso. Por lo tanto, el puente no en-

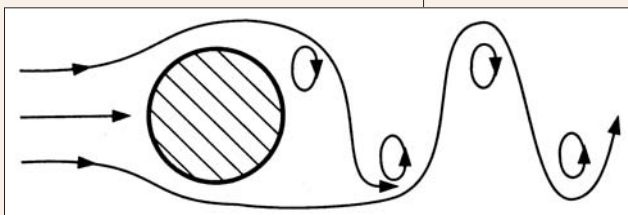


Fig. 6. Fenómeno de desprendimiento de remolinos

¹ Library of Congress, Prints and Photographs Division, HAER WASH,27-TACO, 11-35.

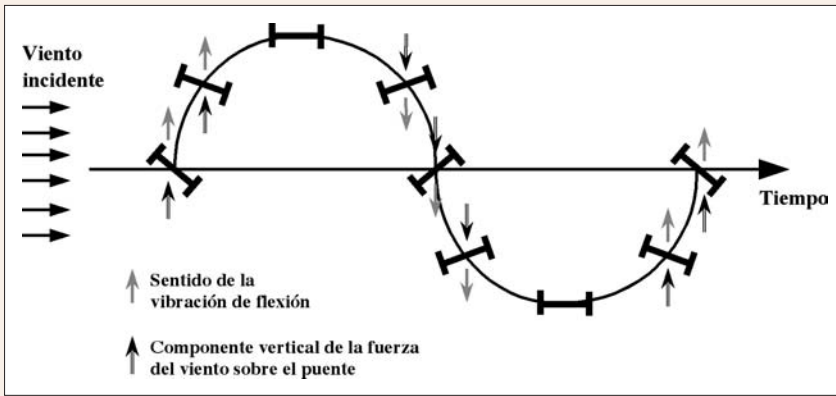


Fig. 7. Absorción de energía del viento por una estructura oscilante

2. Desprendimiento de remolinos

Este fenómeno se comenzó a estudiar en detalle durante los primeros años del siglo XX [Bénard, 1908] y establece que, para determinados valores del número de Reynolds, el flujo corriente abajo de un cilindro circular situado perpendicularmente a una corriente incidente uniforme se caracteriza por el desprendimiento alternado y periódico de remolinos que giran en sentido horario y antihorario de forma alternativa (Fig. 6). Esta circunstancia genera sobre el cilindro fuerzas laterales periódicas que son la causa de las vibraciones en un plano perpendicular a la corriente incidente.

Algunos investigadores como **Theodore Von Kármán**, famoso ingeniero aeronáutico, demostraron mediante ensayos experimentales que esta teoría se podía generalizar a otros tipos de estructuras no cilíndricas, como el puente de Tacoma, por lo que ahora se podría hablar de la existencia de una acción periódica sobre el puente.

Esta frecuencia de desprendimiento de remolinos se obtendría por medio de la siguiente expresión [Strouhal, 1878]:

$$f_v = \frac{S \cdot v_m}{D} \quad (3)$$

siendo v_m la velocidad media de incidencia del viento, D el canto del puente, en este caso 2'4 metros, y S una constante adimensional dependiente de la forma de la estructura, denominada "número de Strouhal", que tomaría el valor de 0,14

[ACHE, 2000].

Cuando se produjo el colapso, la velocidad del viento era del orden de 65 km/h, con lo que la frecuencia de desprendimiento de remolinos, f_v , sería aproximadamente 1 Hz. Sin embargo, el puente estaba vibrando a una frecuencia de 0,2 Hz. Por lo tanto, y puesto que ambas frecuencias no coinciden, no se pudo producir ninguna resonancia, por lo que el desprendimiento de remolinos tampoco fue la causa del colapso.

Es de destacar que, durante muchos años, el colapso del puente ha sido mostrado, fundamentalmente en libros de texto [Den Hartog, 1985], como un ejemplo de estructura que ha entrado en resonancia. Evidentemente, ha quedado demostrado que se trata de un error.

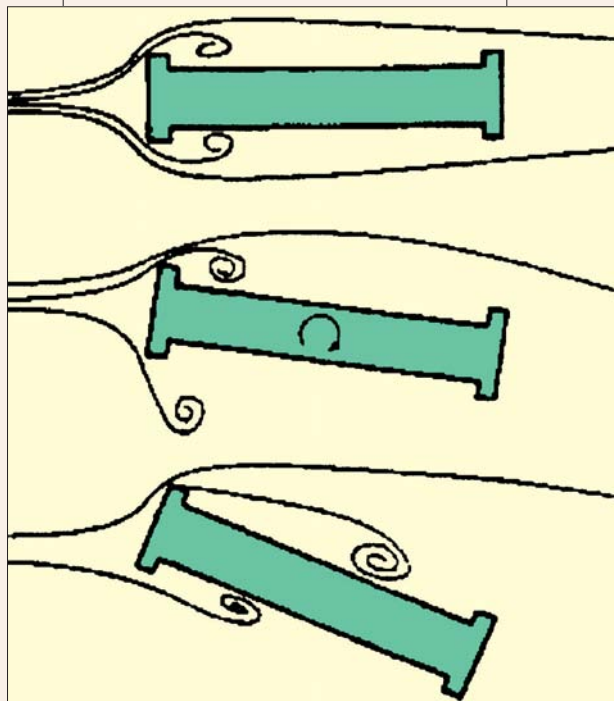


Fig. 8. Remolinos formando parte de la vibración autoexcitada sobre el tablero del puente de Tacoma

3. Inestabilidades aeroelásticas

Estas inestabilidades aparecen cuando un cuerpo sometido a un flujo de viento se mueve o deforma apreciablemente. Estas deformaciones producen variaciones en la forma de la interacción entre viento y estructura que modifican las fuerzas aerodinámicas ejercidas por el viento, lo que, a su vez, afecta a las propias deformaciones del cuerpo. En algunas situaciones, dichas fuerzas tienden a seguir aumentando progresivamente la deformación del obstáculo, causando su fallo por fatiga o al alcanzar tensiones excesivas. Se trata, por tanto, de una vibración autoexcitada.

Es éste un problema típico en Ingeniería Aeronáutica ya que se puede dar en las alas de las aeronaves, aunque también puede ocurrir en otras estructuras. En el caso del puente de Tacoma, el factor desencadenante de esta inestabilidad fue el solape de la oscilación existente de flexión con una vibración de torsión, ocasionado por el fallo de un cable de suspensión [USFWA, 1941].

El proceso hasta ahora descrito se denomina flameo o flutter y concretamente aparece cuando para una fase determinada entre torsión y flexión, la estructura extrae energía del flujo constante de aire. Así, la figura 7 muestra el movimiento de la sección

transversal del puente cuando las frecuencias de torsión y flexión son iguales y existe ese desfase entre oscilaciones; en este caso, es posible la absorción de cierta energía, procedente del trabajo realizado por el viento sobre la estructura, que se emplea en aumentar sistemáticamente las deformaciones.

Así, en el puente de Tacoma, el giro del tablero ocasionado por la torsión fue creciendo siste-

Fig. 9. Diagrama para la estimación de la sensibilidad de edificios frente a los efectos dinámicos inducidos por el viento

máticamente en cada ciclo, lo que supuso un aumento de las tensiones sobre el material que provocaron el fallo estático o, puesto que dichas tensiones eran variables, un fallo por fatiga a bajos ciclos.

Este fenómeno es más complejo de lo que aquí someramente se ha expuesto. De hecho, en esta situación también se producen remolinos variables en posición y magnitud que actúan sobre el tablero y que influyen en la oscilación y en el aporte de energía (Fig. 8). Una explicación más detallada se puede encontrar en la bibliografía [Billah y Scanlan, 1991].

Los efectos dinámicos del viento en la normativa

Hasta hace pocos años, a nivel de normativa general, prácticamente no se había contemplado la posibilidad de que ocurrieran estos efectos sobre las estructuras, tal como se puede observar en la instrucción "NBE-AE/88, Acciones en la Edificación", en donde únicamente se considera la acción del viento como acción estática.

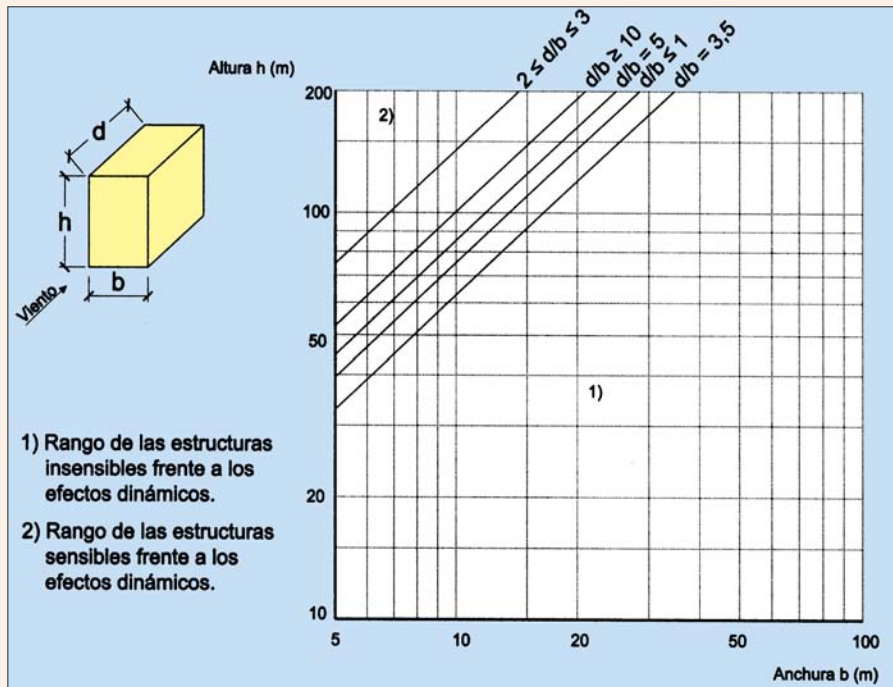
Sin embargo, en el más reciente Código Técnico de la Edificación (C.T.E.) se especifica que, en el caso de estructuras sensibles a los efectos dinámicos inducidos por el viento, será necesario efectuar un análisis dinámico detallado y comprobar su seguridad frente a la fatiga.

Así, se consideran especialmente sensibles aquellos edificios cuyas dimensiones cumplen alguna de las siguientes relaciones:

$$h > 100 \text{ m} \quad \frac{h}{d} > 10 \quad \frac{h}{b} > 10$$

siendo h la altura del edificio, d su dimensión en el sentido paralelo a la dirección del viento y b en el sentido perpendicular al viento.

También se deberá llevar a cabo un análisis detallado en los casos en que se cumplan simultáneamente las



siguientes relaciones:

$$h < 100 \text{ m} \quad \frac{h}{d} < 10 \quad \frac{h}{b} < 10$$

Si, conforme a la figura 9, el caso está situado en el rango de las estructuras sensibles frente a los efectos dinámicos.

Ahora bien, ¿en qué consiste ese análisis detallado? El Eurocódigo 1 (Parte 2-4), cuyo ámbito de aplicación es más amplio que el C.T.E. puesto que incluye tanto las estructuras de edificación como de Ingeniería Civil, proporciona métodos de cálculo para cada uno de estos efectos dinámicos. En general, en estos métodos se determina una velocidad crítica dependiente de distintos parámetros geométricos y modales de la estructura y se ha de conseguir en el diseño que dicha velocidad se aleje lo más posible de la velocidad del viento actuante.

Además, en el caso específico de las inestabilidades aeroelásticas se establecen unos sencillos criterios para valorar la sensibilidad de las estructuras a estos efectos. Si estos criterios no se satisfacen se deben realizar cálculos numéricos o ensayos en túnel de viento.

Conclusiones

En los últimos años, el diseño estruc-

tural está conduciendo a la realización de edificios esbeltos y estructuras ligeras y de grandes luces. En algunos casos, los efectos dinámicos del viento pueden ser especialmente peligrosos, por lo que deben ser estimados para evitar sucesos similares al ocurrido en Tacoma. Afortunadamente, las normativas más recientes han introducido métodos de cálculo y sugerido la necesidad de realizar ensayos sobre modelos reducidos en túnel de viento, así como cálculos numéricos. Todo ello conducirá a que los diseños sean más seguros y fiables que los de décadas anteriores.

Referencias bibliográficas

1. **ACHE** (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), "Problemas de vibraciones en estructuras", Colegio de Ingenieros de C. C. y P. Madrid, 2000.
2. **AENOR**, "Eurocódigo 1. Parte 2-4. Acciones en estructuras. Acciones del viento", Madrid, 1997.
3. **Bénard, H.** "Formation de centres de giration à l'arrière d'un obstacle en mouvement", C.R. Acad. Sci. París, Nº 147, pp. 839-842, 1908.
4. **Billah, K.Y.; Scanlan, R.H.** "Resonance, Tacoma narrows bridge fai-