

INESTABILIDAD DINAMICA DE CHIMENEAS METALICAS POR LA ACCION DEL VIENTO (*)

Por JOSE LUIS SANCHEZ LOPEZ
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

El estudio y consideración de la acción del viento sobre las estructuras viene siendo objeto de gran atención, tanto por la gravedad de sus efectos como por la complejidad de algunas de las estructuras que se realizan hoy con frecuencia. El artículo se refiere concretamente al tema de las chimeneas metálicas y las solicitaciones a considerar, exponiéndose la aparición, dispersión y efectos de los torbellinos de von Karman, los fenómenos de resonancia y capacidad de amortiguamiento de la chimenea y factores que sobre ellos influyen, refiriéndose, por último, al empleo de modelos reducidos para el estudio de estos problemas.

Los inesperados accidentes ocurridos en algunos tipos de estructuras metálicas obligaron, hace algunos años, a realizar una reconsideración acerca de las acciones eólicas. La ruina del puente colgante de Tacoma quizá sea el más espectacular, pero han sido varios los casos con daños parciales e incluso totales.

Aunque los nuevos tratados y las últimas normas llaman la atención acerca del fenómeno, es todavía escasa la bibliografía española con el estudio y examen práctico del problema. Dada la variedad de tipos estructurales en que puede presentarse (puentes colgantes, chimeneas, torres metálicas, puentes de tuberías, etc.), nos centraremos al particularizar en el caso de las chimeneas metálicas; para ello se expondrá, primero, la aparición, dispersión y efectos de los torbellinos de von Karman, pasándose, a continuación, a analizar los factores que influyen en el fenómeno.

No hay, pues, aportación original al tema, sino una presentación del mismo con el afán de que los ingenieros de proyectos (cuya variedad de temas a tratar les impide, a veces, una adecuada especialización en cada uno) tengan al alcance la información necesaria. Se acompañan las referencias bibliográficas empleadas que permitan un más detallado estudio de cada uno de los puntos expuestos.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 28 de febrero de 1973.

Notación empleada.

Cuando en el texto no se especifique el significado de una letra, responde al que se indica a continuación:

- D = diámetro de la chimenea.
- E = módulo de elasticidad del material.
- I = inercia de la sección de la chimenea.
- N = frecuencia propia de la chimenea.
- P = peso de la chimenea por unidad de longitud.
- R = número de Reynolds.
- T = periodo de vibración de la chimenea.
- V_{cr} = velocidad crítica.
- Z = amplitud de oscilación del extremo de la chimenea.
- f = frecuencia de dispersión de vórtices.
- l = longitud o altura de la chimenea.
- ρ = densidad del aire.
- ν = viscosidad cinemática.

1. Torbellinos de von Karman.

Supuesta una chimenea metálica sometida a la única acción del viento, deben estudiarse varios efectos:

- a) Flexión estática originada por la presión del viento.
- b) Efectos dinámicos que se reflejarán en la mayoración correspondiente.
- c) Flecha respecto a la posición normal y flexión secundaria originada por la ex-

centricidad que significa dicha flecha para las cargas verticales.

- d) Inestabilidad dinámica por posible aparición de la resonancia.

Olvidando ahora los tres primeros puntos, así como las restantes sollicitaciones (peso propio, efecto sísmico, etc.) y los fenómenos de pandeo y abolladura, centraremos la atención en el punto d.

El comportamiento de la chimenea, en el supuesto hecho, será el de un cilindro inmerso en un fluido en movimiento; por ello consideramos como primera variable la velocidad del fluido, analizando las variaciones experimentadas en la distribución de presiones conforme aumenta dicha velocidad. Siendo ésta pequeña, el régimen de presiones en el perímetro del cilindro será similar al de un fluido en reposo; si dicha velocidad aumenta, el régimen de presiones viene definido por el número de Euler local:

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2/2},$$

existiendo perfecta simetría (estamos en movimiento irrotacional) entre las partes anterior y posterior del cilindro. Si la velocidad sigue aumentando, la capa límite empieza a separarse del obstáculo, dando lugar a los primeros giros de la partícula elemental y al vórtice correspondiente. En la figura 1 se recoge la variación de distribución de presiones con el número de Reynolds.

Esta formación (con la siguiente desaparición) de vórtices no ocurre simétricamente respecto al obstáculo, sino de una forma alternada, coincidiendo la aparición del vórtice de un lado de la estela con la desaparición del correspondiente en el lado opuesto. Se originan, pues, zonas de presión y depresión alternadas que, actuando sobre la chimenea, dan lugar a las oscilaciones correspondientes en sentido normal al de la dirección del fluido (fig. 2).

En la hipótesis de irrotacionalidad del movimiento von Karman obtuvo la relación (fig. 3):

$$\frac{h}{a} = 0,281,$$

indicando, además, que el conjunto de vórtices

se mueve con relación al fluido con la velocidad:

$$\mu = 0,354 \frac{\Gamma}{a},$$

siendo Γ circulación del vórtice.

Particularizando al caso que nos interesa, es decir, movimiento del fluido en torno a un cilindro, las dimensiones que caracterizan la estela de vórtices, en función del diámetro del cilindro en cuestión, son:

$$h = 1,21 D, \quad a = 4,30 D,$$

y, a su vez, la citada velocidad de los vórtices es:

$$\mu = 0,14 V.$$

Si referimos esta última velocidad al sólido, será:

$$V - \mu = 0,86 V.$$

y, por tanto, la frecuencia de los vórtices:

$$f = \frac{0,86 V}{4,30 D} = 0,20 \frac{V}{D}.$$

En realidad estas expresiones que estamos manejando son aproximadas, ya que no basta la velocidad para caracterizar el movimiento del fluido. Así, la expresión correcta de la última fórmula señalada es:

$$f = \frac{S V}{D},$$

siendo S el coeficiente de Strouhal, cuyo valor oscila en torno a 0,20 para un amplio margen del número de Reynolds, pero que, en definitiva, varía con él. (Puede verse esta relación en el gráfico de la página 1.586 del artículo de C. Delage citado en la bibliografía.)

El movimiento depende, al tiempo que de la velocidad del fluido, de su viscosidad y de la forma del cuerpo, quedando perfectamente caracterizado mediante el número de Reynolds:

$$R = \frac{S V}{\nu}$$

Por ello es necesario señalar la zona que nos interesa como de posible inestabilidad. El valor

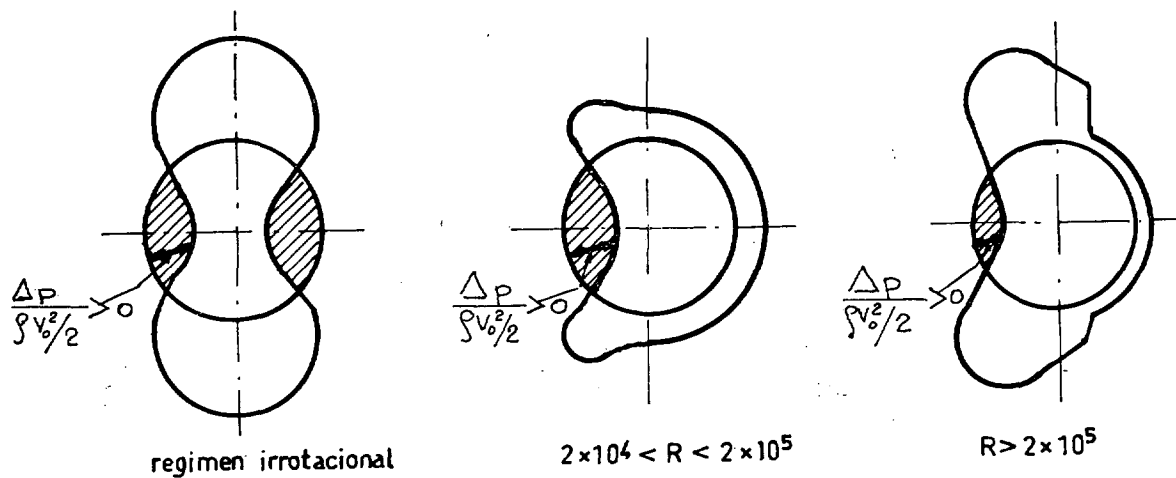


Fig. 1. — Régimen de presiones en un cilindro inmerso en un fluido en movimiento.

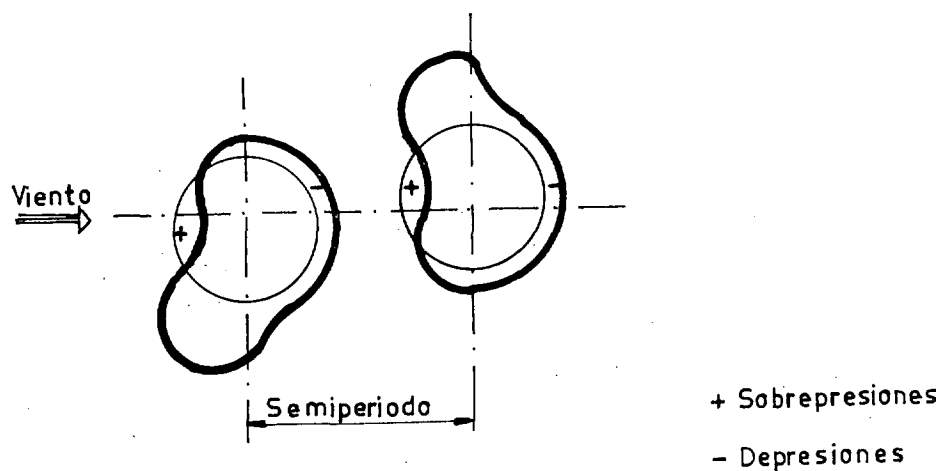


Fig. 2. — Oscilación de la chimenea.

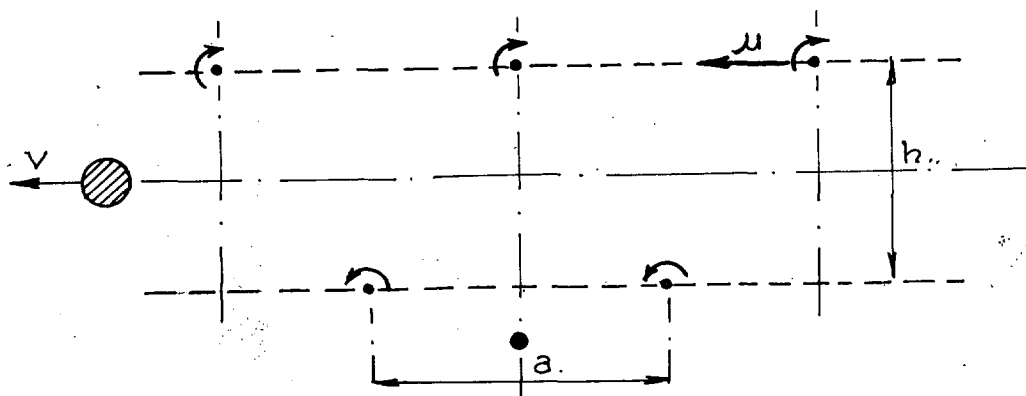


Fig. 3. — Estela de los vórtices.

inferior suele fijarse en torno a $R = 50$, aceptándose como límite superior $R = 10^7$, ya que a partir de este valor los torbellinos dejan de obedecer a una ley regular, careciéndose de datos experimentales. Si bien la dispersión de vórtices es regular y periódica en el intervalo indicado, hay en él una zona, correspondiente a los números de Reynolds comprendidos entre 3×10^5 y $3,5 \times 10^6$, en el que dicha dispersión es aperiódica y anormal. (Para más detalles consúltese el artículo de Scruton y Flint citado en la bibliografía.) Gracias a las experiencias de Roshko (en el año 1961), se comprobó que a partir de $R = 3,5 \times 10^6$ volvía a tener lugar la periódica dispersión de los vórtices. Recordando que para el aire a 17°C la viscosidad cinemática es $\nu = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$, la zona conocida de inestabilidad corresponde a:

$$7,5 \times 10^{-4} < V \cdot D < 150,$$

estando expresados V en m/s y D en m.

2. Resonancia. Análisis de los factores.

Explicado anteriormente el proceso de dispersión de vórtices, así como la aparición de las oscilaciones normales a la dirección del viento, es claro que, teóricamente, la estructura entrará en resonancia cuando la frecuencia estudiada de dispersión coincida con la natural de la chimenea. En realidad, el proceso es más complejo por cuanto la chimenea se va a comportar como un sistema elástico con una capacidad propia de disipación de energía. Por ello no nos basta con estudiar los factores hasta ahora citados, sino que será necesario considerar:

- La frecuencia de dispersión de vórtices.
- La frecuencia natural de la chimenea.
- La capacidad de amortiguamiento inherente a la chimenea y la fuerza aerodinámica que aparece.
- Las características del terreno en que va a apoyar la cimentación.

En realidad, estos puntos están íntimamente interconectados, ya que la capacidad de amortiguamiento y la excitación aerodinámica dependen en gran manera del terreno de cimentación y, a su vez, influyen en la frecuencia real de la chimenea; sin embargo, la posibilidad de

independizarlos nos permitirá un estudio más claro de cada uno de ellos.

a) Frecuencia de dispersión de vórtices.

Ya se indicó antes que corresponde a Strouhal el haber fijado esta frecuencia:

$$f = \frac{S V}{D}$$

S = número de Strouhal, que para chimeneas circulares puede tomarse igual a 0,20.

b) Frecuencia natural de la chimenea.

El estudio de la frecuencia se puede realizar estableciendo el equilibrio entre las fuerzas dinámicas y las fuerzas internas, o bien aplicando el principio de conservación de la energía. El sistema adecuado dependerá, en cada caso, del tipo estructural que se esté estudiando.

En el caso de la chimenea cilíndrica, del que nos estamos ocupando particularmente, el período exacto es:

$$T = \frac{2\pi}{3,515} \sqrt{\frac{P}{gEI}}$$

Si se necesita estudiar a otros casos, puede usarse el método de Rayleigh. (Consúltese las páginas 38, Método de Rayleigh, y 395, Período exacto, del libro de S. Timoshenko citado en la bibliografía.) Igualando la energía potencial máxima del cuerpo en la posición de flecha máxima, con su energía cinética en la de flecha nula, es decir:

$$E_p = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{M^2}{EI} dx = \frac{1}{2} \int_0^l EI \frac{d^2 y}{dx^2} dx$$

$$E_c = \frac{1}{2} \int_0^l V^2 dm = \frac{1}{2} w_0^2 \int_0^l m y^2 dx$$

$$E_p = E_c$$

w_0 = pulsación propia de la chimenea.

m = masa por unidad de altura de la chimenea.

V = velocidad del fluido.

Hay que señalar dos particularidades en este punto de determinación de la frecuencia natural de la chimenea:

1. Debe de utilizarse el módulo dinámico de elasticidad para obtener el período correspondiente.
2. En el caso de ir protegida la chimenea con el revestimiento interior correspondiente, la inercia de la misma debe considerarse independiente de dicho revestimiento, ya que para incluirlo debe asegurarse el perfecto funcionamiento de ambos materiales heterogéneos como una misma unidad, y aun en este caso habría de tenerse presente las diferentes características (respuesta a la excitación) de cada uno de los materiales.

Supuesta, pues, una chimenea con sus características geométricas y físicas bien definidas, la única variable que aparece al igualar su período al de dispersión de vórtices es la velocidad del viento:

$$f = N = \frac{SV}{D}$$

que para $S = 0,20$ es:

$$V_{cr} = \frac{5D}{T}$$

La velocidad del viento que verifica la ecuación anterior (V_{cr}), originando la coincidencia de períodos y, por tanto, la posible aparición de la resonancia, se llama velocidad crítica. Es interesante señalar que estas velocidades, para relaciones de dimensiones normales en chimeneas, suelen ser cifras que se presentan con bastante asiduidad, bastándonos indicar qué valores comprendidos entre 20 y 50 Km/h (no es necesaria la concurrencia de factores extraordinarios en la naturaleza para su presentación) pueden originar, teóricamente, la resonancia. (De gran valor práctico es el gráfico de la página 256 del artículo de K. Irish y R. G. Cochrane citado en la bibliografía. Este artículo será de mucha utilidad en el estudio práctico de cualquier caso.) Si analizamos la chimenea definida en la figura 4 obtenemos:

$$T = 1,79 \text{ seg.}$$

$$V_{cr} = 9,77 \text{ m/s} = 35,17 \text{ Km/h.}$$

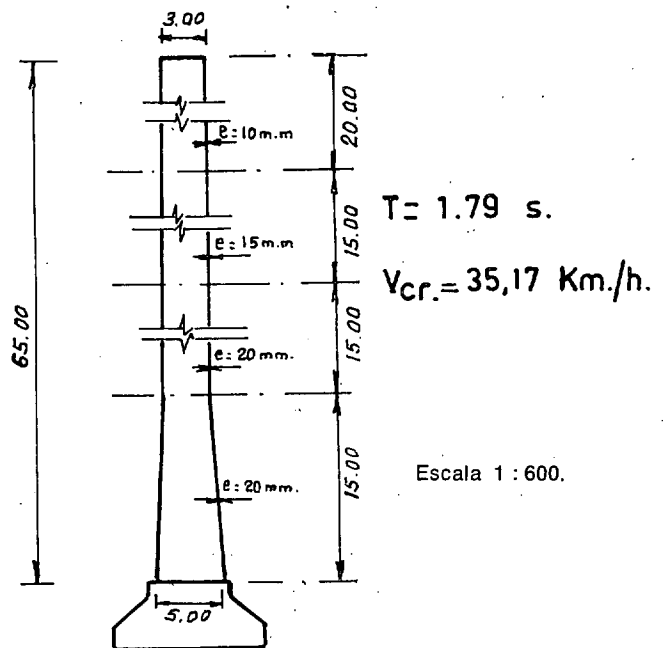


Figura 4.

Velocidad que el viento alcanza con suma frecuencia en circunstancias completamente normales.

Independientemente de lo anterior pueden aparecer otras velocidades críticas correspondientes a las frecuencias de dispersión que son múltiplos enteros de la primera frecuencia de resonancia. De cualquier forma, estas frecuencias suelen corresponder a velocidades demasiado elevadas, por lo que su interés es bastante secundario. (Puede consultarse el artículo de C. Delage citado en la bibliografía.)

c) *Capacidad de amortiguamiento inherente a la chimenea y fuerza aerodinámica producida.*

El aumento de amplitud de las oscilaciones que conducen a la resonancia está condicionado, de una forma muy particular, por el amortiguamiento propio de la chimenea. Funcionará ésta como un sistema elástico sobre el que actúan unas fuerzas y a las que responde con una amortiguación estructural determinada. La oscilación empieza cuando la energía debida al viento supera a la disipada por amortiguación, pudiendo crecer indefinidamente en el caso teórico de que ambas fueran independientes de la

amplitud; la realidad es que esta dependencia existe, influyendo, por tanto, en las oscilaciones producidas.

Cualquier coeficiente de amortiguamiento que pueda definirse dependerá de numerosos factores: materiales, velocidad, amplitud del desplazamiento, etc.

Normalmente suele definirse el grado de amortiguación por el logaritmo de la relación de la amplitud de dos oscilaciones sucesivas:

$$\delta_s = \log \frac{Z_{n-1}}{Z_n},$$

y empleando esta magnitud se define el coeficiente de amortiguamiento por:

$$k_s = \frac{2 M \delta_s}{D^2},$$

siendo M la masa equivalente por unidad de longitud.

Definido este coeficiente, es necesario ver la excitación aerodinámica producida por la dispersión y la relación de ambas magnitudes.

Suponiendo que el movimiento de un punto de la chimenea sometida a la acción del viento, se considere como armónico simple, y llamando:

$$\eta = Z/D,$$

$$\eta = \eta_0 \sin w t.$$

la fuerza aerodinámica por unidad de longitud es:

$$F = \rho V^2 D \eta_0 (A \sin w t + B \cos w t) = H_a z + K_a \frac{\partial z}{\partial t},$$

que, teniendo en cuenta la ecuación que nos definía el desplazamiento, pueden ponerse:

$$H_a = \rho V^2 A, \quad K_a = \rho V^2 \frac{B}{w}.$$

Como se ve, se ha descompuesto la fuerza en sus dos componentes en fase y en cuadratura. Transformando los dos coeficientes en adimensionales se demuestra (puede verse detallada esta demostración en el apéndice del artículo de Scruton y Flint citado en la bibliografía) que la componente en fase de la fuerza aerodinámica

es despreciable. El movimiento está, pues, condicionado a K_a , cuya relación con el coeficiente de amortiguamiento nos dirá si el movimiento se incrementará o será amortiguado. Así, en el caso de que la oscilación se mantenga constante:

$$K_a = K_s.$$

Con el objeto de relacionar la estabilidad de una estructura con el coeficiente de amortiguamiento, Scruton y Flint confeccionaron unos gráficos que, representando en los ejes $2 M \delta_s / \rho D^2$ y $V/N D$ (velocidad reducida), fijan zonas de estabilidad e inestabilidad para diferentes secciones transversales. Pueden verse estos gráficos, para el caso particular de chimeneas cilíndricas en el artículo de K. Irish que se cita en la bibliografía, y con toda la generalidad en el artículo de dichos autores igualmente citado. Su utilidad puede ser grande por cuanto da una primera orientación acerca de la zona en que se encuentra la chimenea en proyecto, aunque deben mantenerse las reservas oportunas, ya que estos gráficos se han obtenido a partir de ensayos en modelos reducidos.

Admitida, pues, la variación senoidal de la fuerza aerodinámica en un ciclo completo, se puede relacionar el coeficiente de excitación estudiado, K_a , con el denominado coeficiente ascensional o de deriva, C_L , del máximo interés y sobre el que se volverá más tarde. Este último coeficiente queda definido por:

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 D C_L \cos 2 \pi N t,$$

pudiendo demostrarse que:

$$C_L = \frac{8 \pi}{3 V_r^2} K_a \eta_0.$$

V_r = velocidad reducida.

d) Características del terreno.

El grado de amortiguamiento conseguido en una estructura varía sensiblemente con el tipo de terreno en que se encuentra apoyada, de forma tal que tipos estructurales semejantes pueden comportarse de forma muy diferente en distintos lugares cuyos terrenos presenten características no similares.

La influencia del terreno sobre la amplitud dinámica (relacionada a la estática) varía desde 3 hasta 10, en función de que sean chimeneas sin revestir o revestidas interiormente, y considerando como terrenos extremos el suelo duro o roca y el suelo blando. (Ver el cuadro recogido en el artículo de K. Irish y R. G. Cochrane citado.)

Este factor es sumamente delicado de enjuiciar, ya que una gran parte de los datos numéricos a emplear se han obtenido en ensayos en modelos reducidos, y el terreno se sustituye, con frecuencia, por artificios más o menos complicados, pero sin ninguna relación (y, por tanto, sin aportación de información adicional) con el terreno que va a sustentar nuestra estructura en proyecto.

3. Chimenea en zona de resonancia.

En principio, el dimensionamiento de la chimenea debe buscar que las características definitivas de la misma permitan situarla en zona fuera de resonancia y, en consecuencia, no sea necesario proceder al diseño de elementos que puedan evitarla, o al sobredimensionamiento en orden a conseguir tensiones admisibles en los materiales empleados, con las solicitaciones adicionales, que aparecen por el aumento de las oscilaciones, debido al fenómeno que estamos estudiando. Sin embargo, según se indicó antes, es frecuente que, con las dimensiones apropiadas, la chimenea proyectada caiga, teóricamente, en zona de resonancia. Deben, en este caso, tomarse las precauciones adicionales correspondientes.

En primer lugar puede tratarse de evitar la formación de vórtices, y con ello su dispersión, que, lógicamente, arrastrará a la desaparición de la fuerza que origina la oscilación transversal de la chimenea. El sistema más empleado (entre los diferentes que a este efecto se han ideado) consiste en la colocación de unas bandas helicoidales que, situadas próximas a la coronación, interrumpen el régimen normal del movimiento del aire. Suele dar buenos resultados y el coste adicional que significa no es elevado frente al presupuesto de la obra. La influencia tan grande que, en el fenómeno, tiene la rugosidad superficial, permite que un aumento artificial de la misma, correctamente estudiado, exija, para que se originen los torbellinos,

unas velocidades del viento excesivamente elevadas, inalcanzables en la práctica.

Independiente de lo anterior, debe estudiarse el aumento que puede aparecer en la sollicitación sobre la chimenea por el incremento en la oscilación, y proceder al cálculo en la hipótesis más desfavorable. En este sentido no hay en la normativa española orientación concreta por lo que se recoge lo señalado en la reglamentación francesa, concretamente en "Regles définissant les effets de la Neige et du Vent sur les constructions et Annexes".

Se supone, en dichas normas, que la estructura está sometida a una fuerza adicional, perpendicular a la dirección del viento, de repartición triangular, asimilable a una fuerza estática de valor máximo para cada nivel:

$$L = \mu C_L \beta' q_{cr} D \frac{H}{l}$$

Esta fuerza se sumará vectorialmente a la de arrastre (de la que no nos ocuparemos por estar fuera del objeto de este escrito) para obtener una resultante total, que se comparará con las fuerzas originadas por la máxima presión dinámica. El caso más desfavorable ha de servir para estudiar las tensiones resultantes. Debe observarse que esta composición se ha de realizar, con las fuerzas originadas por el viento, cuando se presenta con una velocidad igual a la crítica, pero nunca con velocidades superiores (mayores presiones, lógicamente) que podrían conducir a un dimensionamiento excesivo.

Sin entrar en la discusión de las magnitudes representadas en la fórmula anterior, cuyos márgenes de variación pueden encontrarse en la norma citada, es interesante prestar una atención especial al coeficiente C_L . Las letras anteriores corresponden:

μ = coeficiente de reducción, función de las dimensiones.

C_L = coeficiente de deriva o ascensional.

β' = coeficiente de mayoración dinámica.

q_{cr} = presión crítica, correspondiente a la primera velocidad crítica del viento.

H = altura del nivel considerado.

Las diferentes experiencias, realizadas con el objeto de determinar un valor de C_L , así como

las mediciones comprobadas sobre obras reales, han conducido a resultados poco homogéneos, variando las cifras desde 1,71 hasta valores inferiores a 0,10. Puesto que en los ensayos el margen queda reducido de 0,66 a 1,71, Den Hartog aconseja tomar $C_L = 1$. Las cifras alcanzadas en mediciones reales son bastante inferiores. Nosotros nos limitaremos a indicar que mientras las normas rusas señalan $C_L = 0,25$, en la citada norma francesa se fija, como valor aconsejable, $C_L = 0,20$. Los valores que, en estas normas, se reflejan para los restantes coeficientes son:

Coeficiente de reducción:

$$\mu = 0,80.$$

Coeficiente de mayoración dinámica:

$$\beta' = 0,10 \text{ acero.}$$

$$\beta' = 0,30 \text{ h. armado.}$$

Siguiendo, pues, lo reseñado más arriba, es inmediata la obtención de la fuerza dinámica producida por las oscilaciones transversales y, en definitiva, el correcto dimensionamiento de la chimenea.

4. Ensayos en modelos reducidos.

El empleo de modelos reducidos ha facilitado el estudio de numerosos problemas, sin cuya ayuda habrían quedado incompletos e incluso sin solución. El fenómeno que nos ocupa es, precisamente, de este grupo, hasta el punto de que la mayor parte de los coeficientes usados corresponden a valores deducidos de ensayos previos; aún más, si se puede realizar un planteamiento matemático, más o menos exacto o aproximado a la realidad, siempre es necesario especificar ciertas condiciones determinantes del problema, pero éstas suelen responder a resultados de ensayos realizados. Así, la irregularidad de la relación entre el coeficiente de Strouhal y el número de Reynolds responde a los resultados de un ensayo. La dificultad en reproducir movimientos con números de Reynolds muy elevados, imposibilita conocer cómo se producirá el fenómeno en esas circunstancias.

Las razones expuestas justifican que un muy elevado número de las publicaciones existentes sobre el tema sean acerca de ensayos en modelos reducidos, cuyo objeto variará en función de los factores a investigar. En definitiva, el carácter eminentemente experimental del problema se manifiesta en la continua realización de pruebas que conduzcan a valores más concordantes con el comportamiento real de estructuras existentes. Cabe resaltar la necesidad de más información acerca del coeficiente de deriva o ascensional, así como del de amortiguamiento, ambos fundamentales para una valoración correcta del esfuerzo aerodinámico producido, causa del fenómeno, y de la respuesta al mismo emitida por el sistema elástico que es la estructura.

Para acabar sólo queda decir que, frente a la frecuencia de ensayos en modelos reducidos, el autor no ha encontrado un solo caso en que se haya empleado el ordenador para reproducir las características del sistema en un modelo matemático, gracias al cual se pudieran investigar los puntos más interesantes y, en hipótesis, difícilmente alcanzables en modelos reducidos.

5. Bibliografía consultada.

1. Delage, C., y Labbe, P.: "Comportement dynamique des cheminees en acier". Annales de l'Institut Technique du batiment et des Travaux Publics. Noviembre 1968.
2. Irish, K., y Cochrane, R. G.: "Wind induced oscillation of circular chimneys and stacks". The Structural Engineer. Junio 1971, págs. 255 y sigs.
3. Regles definissant les effets de la Neige et du Vent sur les Constructions et Annexes.
4. Rouse H. Hidráulica. Año 1960.
5. Scruton, C., y Ray Flint, A.: "Wind-excited oscillations of structures". Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Abril 1964, págs. 673 y sigs.
6. Timoshenko, S.: "Problemas de vibración en ingeniería".
7. Wootton, L. R. "The oscillations of large circular stacks in wind". Proceedings of the Instituto of Civil Engineers. Agosto 1969, págs. 573 y sigs.