

# CUADERNOS INTEMAC

## Análisis de la acción del viento en los edificios

### *Analysis of wind action on buildings*

José Ramón Arroyo Arroyo  
Ingeniero Industrial

Juan José Benito Muñoz  
Dr. Ingeniero Industrial

Ramón Álvarez Cabal  
Dr. Ingeniero Industrial



**INTEMAC**

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

**N.º 28**

4.º TRIMESTRE '97



METIRE UT SCIAS

## INTEMAC

### INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

CONTROL DE PROYECTO

CONTROL DE OBRA

GARANTIA DE CALIDAD

SONDEOS, ENSAYOS E INFORMES GEOTECNICOS

INFORMES DE PATOLOGIA, REHABILITACION Y REFUERZOS DE CONSTRUCCIONES

OBRAS PUBLICAS  
EDIFICACION  
INSTALACIONES



**INTEMAC**  
AUDIT

### AUDITORIA TECNICO-ECONOMICA DE CONSTRUCCIONES

- ASESORIA EN EL PLANTEAMIENTO Y EN LA CONTRATACION DE LA OBRA
- SEGUIMIENTO DE COSTOS Y PLAZOS DURANTE LA CONSTRUCCION
- VALORACIONES DE TERRENOS, INMUEBLES Y CONSTRUCCIONES
- AUDITORIAS DE TRABAJOS PARCIALES Y DE LIQUIDACION DE LA OBRA



**INTEMAC**  
**ECO**

### AUDITORIA TECNICA MEDIOAMBIENTAL

CONTROL DE IMPACTO AMBIENTAL

Obras Públicas

Edificación

Instalaciones

CONTROL DE CALIDAD AMBIENTAL

Aire

Agua

Ruido

AUDITORIA MEDIOAMBIENTAL

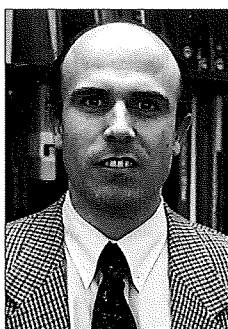
ASESORAMIENTO EN MATERIA DE MEDIO AMBIENTE

---

## ANÁLISIS DE LA ACCIÓN DEL VIENTO EN LOS EDIFICIOS.

---

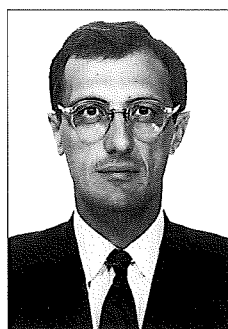
### ANALYSIS OF WIND ACTION ON BUILDINGS



**José Ramón Arroyo Arroyo**

Ingeniero Industrial  
Sección de Estructuras  
de INTEMAC

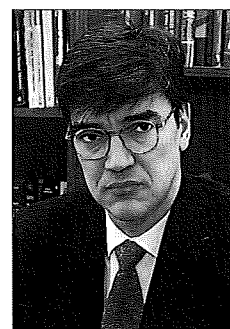
Mechanical Engineer  
Structural Section  
of INTEMAC



**Juan José Benito Muñoz**

Dr. Ingeniero Industrial  
Prof. Titular de la Universidad  
Nacional de Educación a Distancia

PhD. Mechanical Engineer  
Full Professor of the Universidad Nacional  
de Educación a Distancia



**Ramón Alvarez Cabal**

Dr. Ingeniero Industrial  
Jefe de la Sección de Estructuras  
de INTEMAC

PhD. Mechanical Engineer  
Head of the Structural Section  
of INTEMAC

---

Copyright © 1997, INTEMAC

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida o distribuida de ninguna manera ni por ningún medio, ni almacenada en base de datos o sistema de recuperación, sin el previo permiso escrito del editor.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

ISSN 1133-9365

Depósito legal: M - 6853-1998  
Infoprint, S.A. - San Vicente Ferrer, 40

---

## **I N D E X**

1. INTRODUCTION
2. LAMINAR FLOW AND TURBULENT FLOW
3. CHARACTERISATION OF THE WIND EFFECT
4. ENGINEERING THE RESPONSE OF SLENDER PRISMATIC BUILDINGS TO GUSTS OF WIND
5. PRACTICAL EXAMPLE

## **I N D I C E**

1. INTRODUCCIÓN
2. FLUJO LAMINAR Y FLUJO TURBULENTO
3. CARACTERIZACIÓN DE LA ACCIÓN DEL VIENTO
4. CÁLCULO DE LA RESPUESTA DE EDIFICIOS PRISMÁTICOS ESBELTOS FRENTE A LAS RACHAS DE VIENTO
5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

## SUMMARY

*Of all the effects on building structures, wind loading is unquestionably one of the most complex and the one that raises most doubts for designers.*

*Indeed, following an apparently simple preamble, the building code itself introduces certain highly important points whose meaning is couched in necessarily succinct wording. This is the case, for instance, of the slenderness factor, which can increase the results of wind load calculations by up to 150% but which is dealt with in a few lines in the final section of the code.*

*Considered in conjunction with the Technological Standard, certain important inconsistencies are observed from the qualitative and quantitative standpoints (differences in the shape and values of the distribution of pressures, wind coefficients, ...).*

*The present paper describes some of the aspects of wind action that constitute the basis of the code and provide a clearer understanding of the premises adopted.*

## 1. INTRODUCTION

Despite the importance attributed to wind action (and the very effective advantage taken of it) throughout history, the evolution of a full understanding of the phenomenon has been surprisingly slow.

By 1806 Sir Francis Beaufort, Admiral of the Imperial Navy, published the "wind force" scale that bears his name and which is still in use today, with only slight modifications (Table 1).

Number	Speed (miles/h)	Name	Effect
0	0-1	calm	Smoke rises vertically.
1	2-3	light air	Smoke drifts. Vanes do not move.
2	4-7	light breeze	Leaves rustle. Vanes begin to move.
3	8-12	gentle breeze	Leaves in constant motion. Light flags extended.
4	13-18	moderate breeze	Dust, leaves raised. Small branches move.
5	19-24	fresh breeze	Small trees begin to sway.
6	25-31	strong breeze	Large branches of trees in motion. Whistling heard in wires.
7	32-28	near gale	Whole tree in motion. Resistance felt when walking against wind.
8	39-46	gale	Twigs and small branches break. Progress generally impeded.
9	47-54	strong gale	Slight structural damage occurs. Slate blown from roofs.
10	55-63	storm	Trees broken or uprooted. Considerable structural damage occurs.
11	64-73	violent storm	Damage all over.
12	74 and above	hurricane	Large-scale damage. Calamity.

Table 1. Beaufort scale

## RESUMEN

*De entre las acciones sobre las estructuras, la de viento es, sin duda, una de las más complejas y de las que más dudas suscita en el calculista.*

*En efecto, tras un enunciado aparentemente simple, la propia normativa introduce algunos puntos de clara importancia cuyo significado permanece, sin embargo, oculto bajo una redacción forzosamente escueta. Es el caso, por ejemplo, del factor de esbeltez, que puede llegar a aumentar el valor de cálculo de la acción hasta un 150% y que no ocupa más que unas pocas líneas en el último apartado de la norma.*

*Si además se considera la Norma Tecnológica, se contemplan inconsistencias de importancia tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo (diferencias en la forma y en los valores de la distribución de presiones, de los coeficientes eólicos, ...).*

*En el presente trabajo se describen algunos de los aspectos de la acción de viento que constituyen la base de la normativa y que permiten comprender los planteamientos adoptados.*

## 1. INTRODUCCION

Si bien la importancia de la acción del viento ha sido reconocida (y muy eficazmente aprovechada) en cualquier época histórica, resulta sorprendente lo lentamente que ha evolucionado la comprensión del fenómeno en toda su extensión.

Ya en 1806 el Almirante de la Marina Imperial Sir Francis Beaufort publicó la escala de "fuerzas del viento" que lleva su nombre y que, con muy escasas modificaciones, se sigue utilizando hoy en día (Tabla 1).

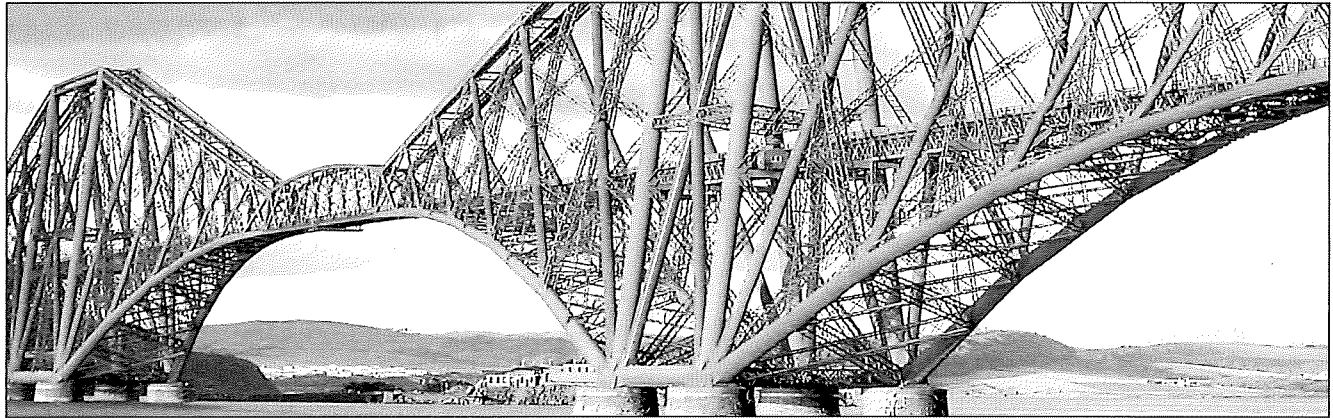
Grado	Velocidad (millas/h)	Designación	Efecto
0	0-1	calma	El humo asciende en vertical.
1	2-3	aire ligero	El humo asciende inclinado. Las veletas no se mueven.
2	4-7	brisa ligera	Las hojas susurran. Las veletas empiezan a moverse.
3	8-12	brisa suave	Las hojas se mueven. Las banderas se despliegan.
4	13-18	brisa moderada	Se mueve el polvo. Se levantan las hojas. Se mueven las ramas más pequeñas.
5	19-24	brisa recia	Los árboles más pequeños se inclinan.
6	25-31	brisa fuerte	Se mueven las ramas gruesas. Los alambres silban.
7	32-38	casi tormenta	Todos los árboles se mueven. Se nota resistencia al caminar contra el viento.
8	39-46	tormenta	Las ramas más finas se rompen. Imposible avanzar contra el viento.
9	47-54	tormenta fuerte	Pequeños daños en las construcciones. Vuelan algunas tejas.
10	55-63	tempestad	Árboles rotos o arrancados. Daños estructurales graves.
11	64-73	tempestad fuerte	Daños generalizados.
12	sup. 74	huracán	Daños a gran escala. Catástrofe.

Tabla 1. Escala Beaufort

As far as the effects of wind on structures are concerned, although it is believed that both Galileo and Newton conducted experiments in this respect in the Seventeenth Century, it was not until the middle of the last century that metallic materials made it possible to build more slender structures, forcing designers to focus greater attention on this matter.

The action of the wind is initially seen as a static force on surfaces transverse to the wind direction. Load figures, deduced from elementary testing, range from 100 to 200 kp/m<sup>2</sup>.

The collapse of the bridge over the Firth of Tay during a storm in 1879 (whereby the failure was initially attributed to the strength of the wind) constituted a first warning about the importance of wind action, and, for a few years at least, a restraint on such relevant developments as the bridge over the Firth of Forth (Fig. 1), engineered for a wind pressure of 270 kp/m<sup>2</sup>.



**Fig. 1 : Puente sobre el Firth of Forth**  
**Fig. 1: Bridge over the Firth of Fort**

Scale model trials in wind tunnels (Eiffel's tests in France and Irminger's in Denmark are well known) made it possible to adjust design pressures to different building configurations, and thus engineer for much smaller loads than at Forth.

The gradual improvement of wind tunnels provided a better understanding of how pressures are distributed among the various parts of the structure, as well as the overall effect of building shape and materials. Moreover, the measurement of wind speeds at different altitudes made it possible to relate loads to building height. This state of development seems to be sufficient for normal structures and is, indeed, what present building codes prescribe.

By 1940, when all the premises seemed to be firmly established, the collapse of the Tacoma Narrows Bridge evidenced the existence of other, obscure factors. A suspension bridge with a span of 840 m, it had been properly engineered according to the know-how of the time, to stand up to the horizontal static wind pressure specified in the respective code (equivalent to a wind speed of 160 km/h). Nonetheless, from the outset, vertical oscillations of significant amplitude were observed even in moderate winds, which finally blew the bridge deck over a few months after it was inaugurated - at wind speeds of only 70 km/h (Fig. 2). The fallen bridge, immortalised by camera shots projected repeatedly in videos and television programmes ever since, proved to be a precursor of impact journalism. By way of comparison, it may be noted that a phenomenon of the same nature and the cause, very likely, of much greater material losses, i.e., "galloping" in electric lines, analysed a decade earlier by Den Hartog, received no mass media attention whatsoever because of the scant drama involved.

The Ferrybridge catastrophe (England, 1965), involving the collapse of three of the eight cooling towers (hyperboloids 91 m in diameter and 114 m high) in a steam power station, called attention to the importance of what is often referred to as the "masking" of a structure by surrounding structures and showed that the analysis of wind action must not be restricted to individual structures, but must also take account of the surrounding circumstances.

In particular with regard to tall buildings, as early as 1930, when the first high rise buildings were being engineered, initial studies were conducted on the specific problems involved in this kind of construction.

In 1940 statistical analysis methods were employed to determine maximum wind speed, paving the way for the analysis of vibrations in tall buildings (D.C. Coile) and subsequent contrast to actual measurements (J.C. Rathbun).

As a result of these analyses it was realised that the response of buildings to wind action does not depend on excitation only, but that the structure's mechanical properties - i.e., distribution of mass, rigidity and damping - are also involved. These latter considerations acquired greater importance as buildings became lighter due to the use of curtain walls in facades, light interior partitions and lightened concrete floors. The result was greater flexibility and



En lo que a los efectos del viento en las estructuras se refiere, y aunque se cree que ya en el siglo XVII tanto Galileo como Newton realizaron los primeros experimentos, no es hasta mediados del pasado siglo cuando el uso de materiales metálicos hace posible la construcción de estructuras más esbeltas obligando a cierta consideración por parte de los proyectistas.

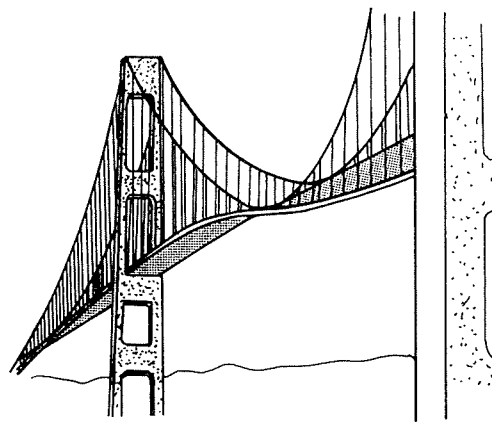
La acción del viento se introduce ya como una fuerza estática sobre las superficies normales a la dirección supuesta. El valor de la carga se deduce de ensayos elementales y se sitúa entre 100 y 200 Kp/m<sup>2</sup>.

El colapso del puente sobre el Firth of Tay en 1879 durante una tormenta (lo que hizo que el fallo se atribuyera inicialmente a la intensidad del viento) supuso un primer toque de atención sobre la importancia de la acción que condicionó durante algunos años realizaciones tan relevantes como el puente sobre el Firth of Fort (Fig. 1), calculado para una presión de viento de 270 Kp/m<sup>2</sup>.

El análisis de maquetas en túneles de viento, (son bien conocidos los ensayos de Eiffel en Francia e Irminger en Dinamarca) permitió ajustar los valores de las cargas de proyecto a distintas configuraciones constructivas, reduciendo significativamente las cargas empleadas en Forth.

La progresiva mejora de los túneles de viento permitió conocer mejor la forma en que las presiones se reparten en cada parte de la construcción, así como el efecto global de la forma y textura del edificio. Por otra parte, la medición de las velocidades de viento a diversas alturas hizo posible relacionar las cargas con la altura del edificio. Este estado de desarrollo parece suficiente para las estructuras normales y, de hecho, es el que predicen las normativas actuales.

Cuando ya parecía que todos los planteamientos estaban suficientemente asentados, el colapso, en 1940, del Tacoma Narrows puso de manifiesto la existencia de aspectos oscuros. Puente colgante de 840 m de luz, había sido correctamente calculado, conforme al estado de conocimientos de la época, para resistir la carga estática horizontal de viento prescrita por la correspondiente normativa (equivalente a una velocidad de 160 km/h). Sin embargo, ya desde su puesta en servicio se observaron oscilaciones verticales de amplitud importante ante vientos de escasa intensidad que acabaron derribando el tablero a los pocos meses de la inauguración y cuando soplaban un viento de tan sólo 70 km/h (Fig 2). La imagen, captada por las cámaras y repetidamente emitida en vídeos y reportajes televisivos, constituye un precursor del periodismo de impacto. En este sentido cabe la comparación con un fenómeno de la misma naturaleza e inductor, probablemente, de pérdidas materiales muy superiores, las vibraciones de "galope" en los tendidos eléctricos, cuyo análisis, realizado ya en la década anterior por Den Hartog, no había alcanzado difusión alguna en virtud de su escaso dramatismo.



**Fig. 2 : Colapso del puente Tacoma Narrows**  
**Fig. 2: Collapse of the Tacoma Narrows Bridge**

La catástrofe de Ferrybridge (Inglaterra, 1965), el colapso de tres de las ocho torres de refrigeración de una Central Térmica (hiperboloides de 91 m de diámetro en la base y 114 m de altura), puso en relieve la importancia de lo que se suele llamar "enmascaramiento" de una construcción por sus vecinas, demostrando que el análisis de la acción de viento no puede limitarse a la estructura estudiada sino que debe incluir su entorno.

En el caso particular de los edificios altos, ya en 1930, y coincidiendo con el proyecto de los grandes rascacielos, se hicieron los primeros estudios de los problemas específicos de este tipo de construcción.

En 1940 se aplicaron los métodos de análisis estadístico a la determinación de la velocidad máxima de viento, abriendo la puerta al análisis de las vibraciones de edificios altos (D. C. Coile) y posterior contraste con las mediciones efectuadas (J. C. Rathbun).

Como resultado de estos análisis fue posible comprender que la respuesta de los edificios a la acción de viento no es función únicamente de la excitación, sino que también intervienen las propiedades mecánicas de la estructura,

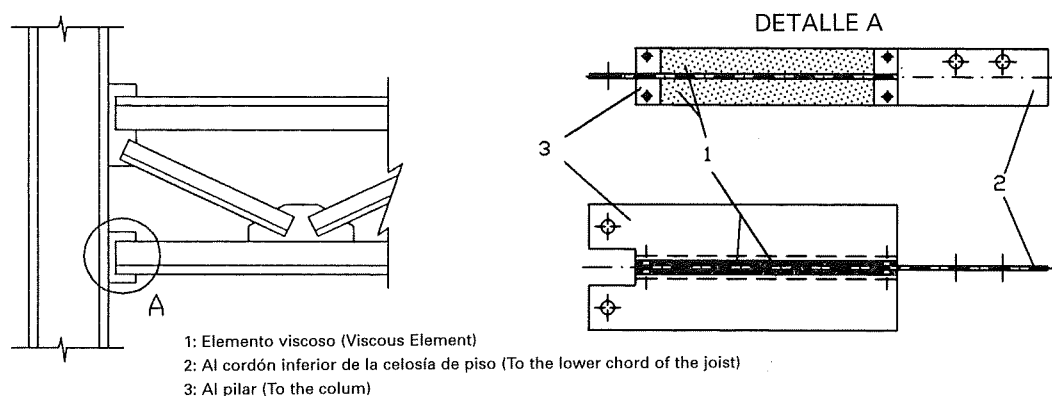
reduced damping. The natural frequency of vibration came closer and closer to standard gust range, which meant that buildings could be subject to substantial resonance that had to be taken into account in the design.

H.W. Liepmann was the first to use statistical concepts to study the resonant response of structures to forces produced by atmospheric turbulence, as described in his paper "On the application of statistical concepts to the buffeting problem."

The application of Liepmann's concepts to buildings called for the development of models representing wind turbulence near the ground, which were proposed by A.G. Davenport in 1961 in his article "The application of statistical concepts to the wind loading of structures". The same author developed a procedure to study the windward response of tall buildings published in an article titled "Gust loading factors".

By the late sixties tools were available to analyse and control high rise response to the wind. Indeed, methods had even been put forward to limit vibrations and were applied - although the results were still uncertain - in such emblematic buildings as the World Trade Center or the Citicorp tower.

In the former case passive premises based on increased structural damping were used (the floor girder bottom chords were attached to the outside pillars with visco-plastic members - Fig. 3).



**Fig. 3 : Amortiguadores utilizados en las Torres Gemelas**  
**Fig. 3: Dampers used in the World Trade Center**

In the Citicorp building, as well as in the CN Tower in Toronto, the John Hancock Tower in Boston and others, TMD (tuned mass damper ) devices were used, members that reduce the amplitude of building vibrations by transmitting them to a huge mass located on the roof (Fig. 4). This essentially creates a two-degree-of-freedom M-K-C (mass-spring-damper) system, that can be adjusted, within a given range of frequencies, to minimise the amplitude of one of the two degrees of freedom (the one corresponding to the building, naturally).

The purpose of these devices is to enhance building comfort and they are in no way related to safety criteria, in which they are not even considered. In any case, these solutions are much too costly for normal buildings, for which design rules are established based on building rigidity, expressed in terms of maximum sidesway at the top (such as  $h/500$ , where  $h$  is the building height).

At this time most efforts are directed towards numeric simulation of the problem. Given the complexity of the fluid mechanics equations used to model such simulations, the necessary computing power has not been available to researchers until very recently. The results obtained, while still at the academic level, are encouraging and numeric simulations may soon complement (and in some cases replace) experimental analysis in wind tunnels. Figure 5 shows the results obtained by the authors using the FLOTRAN program to model the flow around a prismatic building.

## 2. LAMINAR FLOW AND TURBULENT FLOW

The grounds for the most general approach to fluid-structure interaction are provided by what is known as the theory of aeroelasticity, which addresses the interaction between the flow and the body immersed in it, given that the shape of the body and the characteristics of the flow are dynamically interrelated.

Three kinds of forces concur in aeroelasticity problems: elastic, inertial and aerodynamic forces. The latter are the forces the fluid exerts on the body and are always difficult to evaluate. Even in the simplest case, a rigid obstacle placed in a uniform stream, the distribution of forces on any given point of the body depend on the flow of the stream and the characteristics of the fluid (density and viscosity), which means that the pressure may vary randomly in some points (turbulence).

esto es, la distribución de masa, rigidez y amortiguamiento. Estas últimas consideraciones adquirieron mayor importancia a medida que los edificios se hacían más ligeros por la utilización de muros cortina en fachada, sistemas ligeros de división interior y forjados aligerados. En consecuencia, resultaban más flexibles y con amortiguamientos menores. La frecuencia de vibración se acercaba ya al rango típico de las rachas, pudiendo llegar a generar en el edificio grandes movimientos de resonancia que han de ser tenidos en cuenta en el diseño.

Fue H. W. Liepmann quien en primer lugar estudió la respuesta resonante de las estructuras a fuerzas producidas por la turbulencia atmosférica aplicando conceptos estadísticos, según describe en "On the application of statistical concepts to the buffeting problem" (1952).

La aplicación de los conceptos de Liepmann a los edificios requería el desarrollo de modelos que representaran la turbulencia del viento cerca del suelo, los cuales fueron propuestos por A. G. Davenport en 1961 en su artículo "The application of statistical concepts to the wind loading of structures". El mismo autor desarrolló un procedimiento para estudiar la respuesta en la dirección del viento en edificios altos que fue publicado en 1967 bajo el título "Gust loading factor".

A finales de los años 60 se disponía ya de las herramientas precisas para el análisis y el control de la respuesta ante viento de los edificios altos. Se había llegado, incluso, al planteamiento de métodos de limitación de las vibraciones que, con resultado incierto, se aplicaron en edificios tan emblemáticos como las Torres Gemelas o el Citicorp.

En el primer caso se utilizaron planteamientos pasivos basados en el incremento del amortiguamiento estructural (el cordón inferior de las vigas de piso se unía a los pilares exteriores a través de elementos visco-plásticos- Fig. 3).

En el Citicorp, al igual que en la CN Tower de Toronto, el John Hancock Tower de Boston y otras Torres utilizaron dispositivos TMD (de Tuned Mass Dampers), elementos que reducen la amplitud de las vibraciones del edificio transmitiéndolas a una gran masa que se sitúa en la azotea (Fig.4). Básicamente se forma un sistema M-K-C (masa-muelle-amortiguador) de dos grados de libertad que se puede ajustar para que, en un rango de frecuencias dado, se minimice la amplitud de uno de los dos grados de libertad (naturalmente, el que corresponde al edificio).

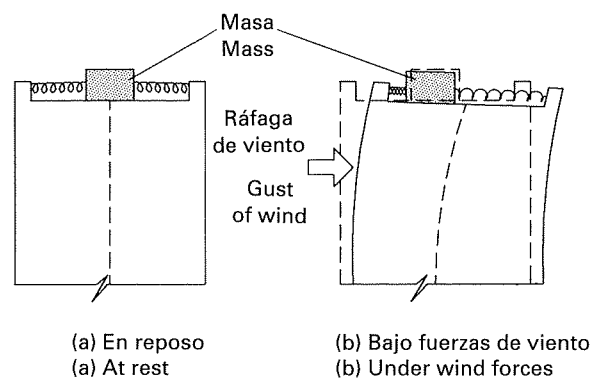


Fig. 4 : Dispositivo TMD  
Fig. 4: TMD device

El objetivo de estos dispositivos es el incremento del grado de confort del edificio y no guardan relación alguna con las comprobaciones de seguridad, en las que no son considerados. En cualquier caso, se trata de planteamientos excesivamente costosos para los edificios normales, para los que se formularon reglas de proyecto basadas en la rigidez del edificio, expresada en términos de desplazamientos límite en cabeza (tales como  $h/500$ , siendo  $h$  la altura del edificio).

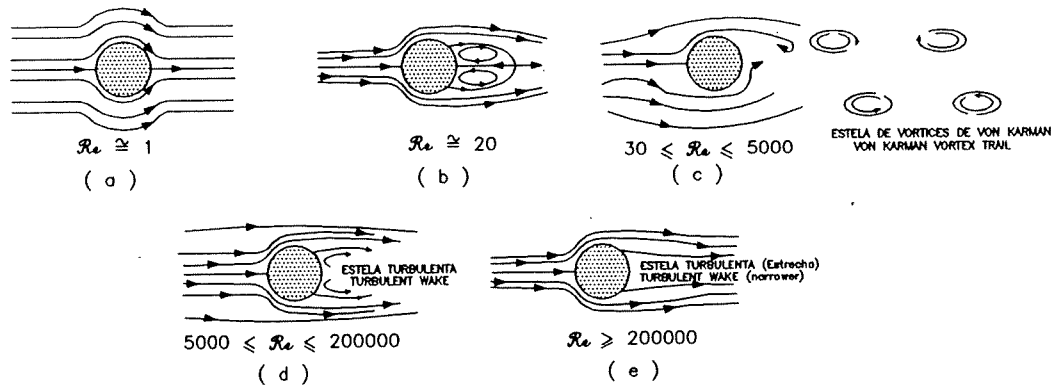
En la actualidad el mayor esfuerzo se está invirtiendo en la simulación numérica del problema. Dada la complejidad de las ecuaciones de mecánica de fluidos que lo modelizan, la potencia de cálculo necesaria no ha estado al alcance de los investigadores hasta tiempos muy recientes. Los resultados obtenidos, si bien se mantienen aún en un nivel académico, resultan muy esperanzadores y cabe esperar que en un futuro muy próximo la simulación numérica complemente (y en algunos casos desplace) el análisis experimental en túneles de viento. La Figura 5 representa los resultados obtenidos por los autores en la modelización del flujo alrededor de un edificio prismático mediante el programa de elementos finitos FLOTRAN.

## 2. FLUJO LAMINAR Y FLUJO TURBULENTO

El planteamiento más general de interacción fluido-estructura es el que sigue la que se conoce como teoría de la aeroelasticidad, que trata de la interacción entre el flujo y el cuerpo en él inmerso, teniendo en cuenta que tanto la forma de éste como las características del flujo se relacionan dinámicamente.

En los problemas de la aeroelasticidad concurren tres tipos de fuerzas: las elásticas, las de inercia y las aerodinámicas. Éstas últimas son las ejercidas por el fluido sobre el cuerpo y resultan siempre de muy difícil evaluación. Incluso en el caso más simple, el de un obstáculo rígido interpuesto en una corriente uniforme, la distribución de presiones en cada punto del cuerpo depende de la velocidad de la corriente y de las características del fluido (densidad y viscosidad), pudiendo llegar a situaciones en las que la presión en algunos puntos varía de forma aleatoria (régimen turbulento).

An example will help to illustrate the above. Take a slender cylinder with a given diameter and surface texture, immersed in a fluid with uniform accelerating flow (Fig 7):



**Fig. 7 : Flujo alrededor de un cilindro**  
**Fig. 7: Flow around a cylinder**

- At very low velocities the particle course follows the shape of the obstacle in continuous symmetrical paths (Fig. 7a). The situation is stationary (the "photograph" of the streamlines does not vary over time) and the flow is said to be laminar. Applying Bernoulli's equation (which, it will be recalled, only establishes the equivalence between pressure and fluid velocities), the distribution of pressures can be drawn for each point. By virtue of the symmetry of the problem the forces resulting from this distribution only have one non-zero component, in the direction of the flow (normally termed "drag").
- As the mean velocity increases, the inertia of the particles becomes greater than the viscosity binding them to the surface of the cylinder, causing the boundary layer to separate abruptly and form downstream eddies (Fig. 7.b). The distribution of pressures in this area changes altogether. Drag is still the only component of the force resulting from the tensions and the net value barely changes. The situation remains stationary.
- If the velocity continues to increase (Fig. 7.c), the eddies are shed from the cylinder at a given rate. Since each time an eddy breaks away the local distribution of pressures changes, transitional across-flow forces (usually called lift) appear. These eddies, known as "Von Karman" vortices, cause windward vertical oscillations in masts and chimney stacks which, despite the low intensity of excitation, can lead to substantial oscillation if the natural frequency of the structure is similar to the frequency at which the vortices break away (it will be recalled that, in only lightly damped structures, resonance amplification is high) and therefore fatigue life is reduced to a very few years. The typical solution in such cases is to weld a helicoidal plate to the structure to modify the position on the circumference where the boundary layer is shed, thereby eliminating the problem.

A photograph of the chimney stack at the University of Helsinki power plant, designed by Aalto (1963), is given in Fig. 6.

The system is, obviously, no longer stationary, although it is stable and periodic.

- As the velocity increases, the shedding of vortices becomes non-periodic. Downwind, a large number of such vortices forms unstably (Fig. 7.d and .e), creating a "wake" inside which the flow is turbulent (the velocity at any given point and any given time is a random variable whose mean value is the velocity far away from the obstacle). The drag component of the force resulting from the tensions declines drastically and the lift force vanishes. This is what is usually termed the "critical" state and marks the transition from laminar to turbulent flow. The width of the wake decreases as velocity increases.

Although the above description is based on an accelerating flow, it can readily be seen that the same effect would be achieved by increasing the diameter of the cylinder (which would obviously increase the velocity of the particles around it, since they would have to travel a greater distance in the same time) or by reducing the viscosity (the force that binds them to the surface).

These three aspects are contained in the well-known "Reynolds number":

$$R_e = \frac{\bar{U} \cdot D}{\nu} \quad [1]$$

Where  $\bar{U}$  is the mean velocity of the flow, D the diameter of the cylinder and  $\nu$  the kinematic viscosity (for air at room temperature,  $0.15 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ).

Un ejemplo ayudará a entender estos aspectos. Piénsese en un cilindro esbelto de diámetro y textura superficial dados, inmerso en un flujo cuya velocidad se incrementa sucesivamente (Fig. 7):

- A muy bajas velocidades la trayectoria de las partículas dibuja el contorno del obstáculo en trayectorias continuas simétricas (Fig. 7.a). La situación es estacionaria (la "fotografía" de las líneas de corriente es la misma en cualquier instante) y el flujo se dice laminar. Aplicando la ecuación de Bernoulli (que, como se recordará, tan solo establece la equivalencia entre presiones y velocidades del fluido) se pueden dibujar las distribuciones de presión en cada punto. En virtud de la simetría del problema la resultante de tal distribución sólo tiene componente en la dirección del flujo (llamada normalmente "de arrastre").
- Al aumentar la velocidad media, la inercia de las partículas supera la viscosidad que las ataba a la superficie del cilindro, produciéndose el desprendimiento brusco de la capa límite y formando remolinos a sotavento (Fig. 7.b). La distribución de presiones en esta zona se modifica totalmente. La resultante de las tensiones sigue teniendo únicamente componente de arrastre y su valor neto apenas cambia. La situación aún es estacionaria.
- Si se sigue aumentando la velocidad (Fig. 7.c), los remolinos se empiezan a separar alternativamente con una frecuencia dada. Como cada vez que se desprende un remolino se modifica la distribución local de presiones aparecen resultantes transitorias normales a la dirección del flujo (se suelen llamar "de sustentación"). Estos remolinos, conocidos con el nombre de "Von Karman" producen oscilaciones transversales a la dirección del viento en mástiles y chimeneas que, pese a la baja intensidad de la excitación, pueden llegar a producir oscilaciones importantes si la frecuencia de la estructura es similar a aquella con la que se desprenden los remolinos (recuérdese que, en estructuras tan poco amortiguadas, la amplificación por resonancia es muy alta), llegándose a la ruina por fatiga en pocos años. Es típica la solución para estos casos, soldar una chapa helicoidal que modifica la posición circunferencial en la que la capa límite se desprende y, por consiguiente, anula el fenómeno.

La fotografía en la Fig. 6 muestra la chimenea de la Central de la Universidad de Helsinki, obra de Aalto (1963)

El sistema ya no es, evidentemente, estacionario pero si estable y periódico.

- Al incrementar aún más la velocidad se pierde la periodicidad en el desprendimiento de remolinos. En la zona de sotavento se produce gran número de tales remolinos en forma inestable (Fig.7.d y e) , creando una "estela" en cuyo interior el flujo es turbulento (la velocidad en cada punto y en cada instante es una variable aleatoria que tiene por valor medio la velocidad lejos del obstáculo). La componente de arrastre de la resultante de tensiones disminuye drásticamente y la de sustentación desaparece. Se suele conocer este estado como "crítico", y designa el paso de régimen laminar a turbulento. La anchura de la estela disminuye al aumentar la velocidad.

Aunque en la anterior descripción se basó en el incremento de la velocidad del flujo, es fácil comprender que el mismo efecto se conseguiría aumentando el diámetro del cilindro (lo que evidentemente incrementaría la velocidad de las partículas en su entorno ya que se verían obligadas a recorrer mas espacio en el mismo tiempo) o disminuyendo su viscosidad (la fuerza que las ata a la superficie).

Estos tres aspectos quedan englobados en el conocido "Número de Reynolds" :

$$R_e = \frac{\bar{U} \cdot D}{\nu} \quad [1]$$

Donde  $\bar{U}$  es la velocidad media del flujo, D el diámetro del cilindro y  $\nu$  la viscosidad cinemática (para el aire a temperatura ambiente 0.15 cm<sup>2</sup>/s).

En la tabla adjunta se comparan las velocidades de viento (en m/s) que separan cada una de las fases descritas en el caso de una chimenea de pequeño diámetro y de un edificio de dimensiones normales.

**Tabla 2 : Valores de la velocidad crítica**

R <sub>e</sub>	Descripción	Estructura	
		Chimenea (D=1 m)	Silo (D=10 m)
1	Sin remolinos	1.5E-5	1.5E-6
20	Dos remolinos simétricos	3.0E-4	3.0E-5
30	Umbral inf. remolinos Von Karman	4.5E-4	4.5E-5
5000	Umbral inferior zona crítica	7.5E-2	7.5E-3
200000	Umbral superior zona crítica	3	0.3

The table below compares the wind speeds (in m/s) required to reach each of the stages described above for a chimney stack with a small diameter and for a normal size building:

**Table 2 : Critical velocity values**

Re	Description	Structure	
		Chimney (D=1m)	Silo (D=10m)
1	No eddies	1.5E-5	1.5E-6
20	Two symmetrical vortices	3.0E-4	3.0E-5
30	Lower threshold, Von Karman vortices	4.5E-4	4.5E-5
5000	Lower threshold, critical zone	7.5E-2	7.5E-3
200000	Upper threshold, critical zone	3	0.3

It will be noted that for the dimensions normally prevailing in construction, critical wind speeds are so low that the effect on the structure is of no concern due to the scant energy involved.

For this reason building codes provide only one distribution of pressures, regardless of the wind speed. Figure 8 shows the proposal laid down in Spanish code NBE-AE-88. Eurocode 1, in turn, defines boundary layer separation in terms of the Reynolds number.

With slight numerical differences, the above can be generalised to include polygonal sections, thereby covering a wide variety of situations encountered in construction.

A final obvious consequence of the low value of the critical speed is, apparently, the scarce utility of the above. Indeed, it is only rarely that a building is isolated enough to consider the current affecting it to be laminar. With very few exceptions (towers standing alone, chimneys stacks in flat surroundings...), buildings are normally located in the wake produced by upwind obstacles (topographic irregularities, trees, buildings, ....) and are, then, in a turbulent flow.

The importance of this is discussed in the following section.

### 3. CHARACTERISATION OF WIND ACTION

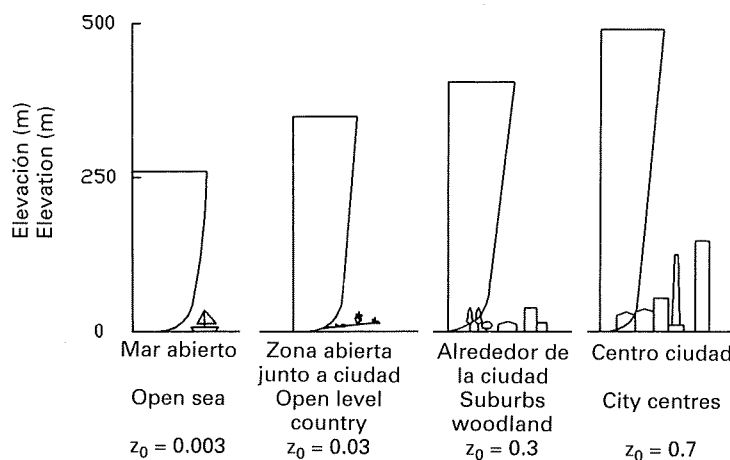
The distribution of wind speeds on the surface of the earth is not substantially different from the distribution found in any other boundary layer: from a speed of zero at the surface, the value increases depending on viscosity and roughness of the terrain to a peak value at a given height.

One generally accepted analytical expression for this kind of variation is what is known as the "logarithmic law"

$$\bar{U}(Z) = \frac{1}{\alpha} U_* \ln \left( \frac{Z - Z_d}{Z_0} \right) \quad [2]$$

Where  $\alpha$  is the Von Karman constant, whose value is 0.40,  $U_*$  is the friction velocity,  $Z_d$  is the height of zero plane displacement and  $Z_0$  is the ground roughness as tabulated in standards and codes for different building locations.

The wind speed profile is given in Figure 9.



**Fig. 9: Perfiles de velocidad de viento**  
**Fig. 9: Profiles of wind speed**

Se comprueba que, para las dimensiones normales en edificación, las velocidades críticas de viento son tan bajas que el efecto sobre la estructura no tiene ningún interés debido a la escasa energía que puede transmitirle.

Es por ello que las normativas tan sólo proporcionan una única distribución de presiones independiente de la velocidad de viento. La Figura 8 muestra la propuesta por la norma Española, NBE-AE-88. El Eurocódigo 1 fija el punto de separación de la capa límite en función del número de Reynolds.

Con pequeñas diferencias numéricas, lo expuesto podría generalizarse a secciones poligonales, abarcando así una amplia generalidad de obras de edificación.

Una última consecuencia evidente del bajo valor de la velocidad crítica es, aparentemente, la escasa utilidad práctica de los expuesto. Efectivamente, en muy escasas situaciones un edificio estará tan aislado que será posible suponer laminar la corriente que le llega. Con la salvedad de algunas construcciones singulares (Torres aisladas, Chimeneas en un entorno plano,..) cualquier edificio se situará en la estela producida por los obstáculos que la corriente se haya encontrado antes en su camino (irregularidades topográficas, árboles, edificios,...). Estará por tanto en régimen turbulento.

La importancia de este aspecto se discutirá en el siguiente apartado.

### 3. CARACTERIZACION DE LA ACCION DE VIENTO

La distribución de velocidades de viento en la superficie terrestre no difiere sustancialmente de la existente en cualquier otra capa límite: partiendo de un valor nulo en la superficie, éste se incrementaría en forma dependiente de la viscosidad y de la rugosidad superficial hasta un valor límite a determinada altura.

Una expresión analítica comúnmente aceptada para esta forma de variación es la designada como "ley logarítmica"

$$\bar{U}(Z) = \frac{1}{\alpha} U_* \ln \left( \frac{Z - Z_d}{Z_0} \right) \quad [2]$$

En la que  $\alpha$  es la constante de Von Karman, de valor 0.40,  $U_*$  es la velocidad de fricción,  $Z_d$  es la cota del plano de desplazamiento cero y  $Z_0$  es la rugosidad del terreno que se encuentra tabulada en normas y códigos para las distintas ubicaciones de los edificios.

La Figura 9 muestra la forma del perfil de velocidades.

El flujo descrito resulta de la superposición de una componente estacionaria y otra fluctuante debida a las sucesivas estelas que resultan de la interposición de obstáculos (y para velocidades superiores a los 10-15 Km/h la propia rugosidad superficial es obstáculo suficiente).

En consecuencia, la velocidad del viento en cualquier punto será la suma de una componente estacionaria  $\bar{U}$  y otra  $U'$  (debida a los vórtices) variable en forma aleatoria tanto en el espacio como en el tiempo (Fig. 10). Esta última es la que representa a las ráfagas.

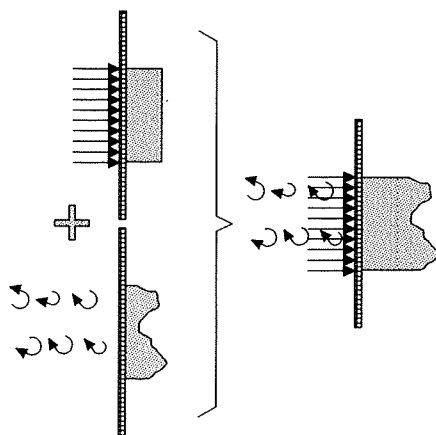


Fig. 10: Régimen turbulento  
Fig. 10: Turbulence

La componente fluctuante de la velocidad es considerada como un proceso aleatorio estacionario, ergódico y gaussiano representado mediante su densidad espectral.

The flow described is the result of the superimposition of a stationary and a fluctuating component due to the successive wakes resulting from obstacles upstream (for speeds above than 10-15 km/h the surface roughness is itself an obstacle).

Consequently, wind speed at any point is the sum of a stationary component  $\bar{U}$  and a second component  $U'$  (due to the vortices) which varies randomly both in space and in time (Fig. 10) and represents gusts.

The fluctuating component of speed is considered to be a random, stationary, ergodic and Gaussian process represented by its spectral density.

J.C. Kaimal and A.G. Davenport proposed two of the expressions most generally used in connection with the spectral density of wind, which are shown below as [3] and [4], respectively:

$$\frac{n S(Z, n)}{U_*^2} = \frac{200 f}{(1 + 50 f)^{5/3}} \quad [3]$$

$$\frac{n S(n)}{U_*^2} = 4 \frac{X^2}{(1 + X)^{4/3}} \quad [4]$$

Where  $n$  is the frequency of the fluctuating speed (gusts),  $S(n)$  the spectral density,  $f = nZ/\bar{U}(Z)$  and  $X = 1200n/\bar{U}$  (10). These equations are plotted in Fig. 11.

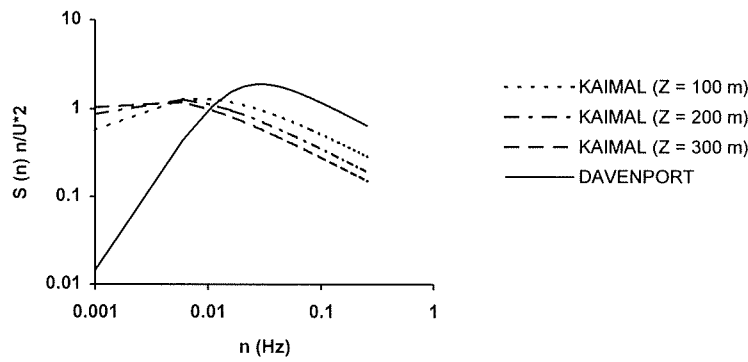


Fig. 11: Densidad espectral de velocidad de viento  
Fig. 11: Spectral density of wind speed

The Davenport spectrum is applied to surface winds, with intense, local vortices, whereas the Kaimal spectra refer to higher altitudes where vortices have a lower frequency and cover larger areas. This explains the difference in the low frequency zone.

The pressure that wind exerts on each point of a solid in its path is expressed as follows:

$$P(Z) = \frac{1}{2} \rho C (\bar{U} + U')^2 \quad [5]$$

in which coefficient  $C$  or the form factor depends on the geometry of the body and is found empirically via wind tunnel testing.

The expectation of the above expression is calculated to find the mean and fluctuating pressure components, yielding:

$$\bar{P}(Z) = \frac{1}{2} \rho C \bar{U}^2 \left( 1 + \frac{\overline{U'^2}}{\bar{U}^2} \right) \quad [6]$$

$$P'(Z) = \frac{1}{2} \rho C \bar{U}^2 \left( 2 \frac{U'}{\bar{U}} + \frac{U'^2 - \bar{U}'^2}{\bar{U}^2} \right) \quad [7]$$

Dropping the second terms in the parenthesis leaves:

$$\bar{P}(Z) = \frac{1}{2} \rho C \bar{U}^2 \quad [8]$$

$$P'(Z) = \rho C \bar{U} U' \quad [9]$$

It follows from the last of these equations that spectral density of pressure can be expressed as:

$$S_p = \rho^2 C^2 \bar{U}^2 S_U \quad [10]$$

If the dimensions of the structure are such that it cannot be treated as a single point, the cross-spectral density of the wind in two points thereof must be found; i.e., the correlation between the wind speed records for two different points,  $A_1$  and  $A_2$ , must be computed.



Algunas de las expresiones que se manejan para la densidad espectral de la acción de viento son las propuestas por J. C. Kaimal y por A. G. Davenport. Son las relaciones [3] y [4] respectivamente:

$$\frac{n S(Z, n)}{U_*^2} = \frac{200 f}{(1 + 50 f)^{5/3}} \quad [3]$$

$$\frac{n S(n)}{U_*^2} = 4 \frac{X^2}{(1 + X)^{4/3}} \quad [4]$$

Donde  $n$  es la frecuencia de la velocidad fluctuante (rachas de viento),  $S(n)$  es la densidad espectral,  $f = nZ/\bar{U}(Z)$  y  $X = 1200n/\bar{U}$  (10). En la Fig. 11 se han representado estas expresiones.

El espectro de Davenport se aplica a los vientos superficiales, con remolinos violentos y de poca extensión, mientras que los de Kaimal se refieren a mayores alturas, en las que los remolinos son mas lentos y extensos. Ello explica la diferencia en la zona de bajas frecuencias.

La presión con la que actúa el viento sobre cada punto del sólido que se le interpone viene dada por la expresión:

$$P(Z) = \frac{1}{2} \rho C (\bar{U} + U')^2 \quad [5]$$

En la que el coeficiente  $C$  de forma depende de la geometría del cuerpo y se obtiene a partir de ensayos en túneles de viento.

Para hallar las componentes media y fluctuante de la presión se calcula la esperanza de la expresión anterior obteniéndose:

$$\bar{P}(Z) = \frac{1}{2} \rho C \bar{U}^2 \left( 1 + \frac{\overline{U'^2}}{\bar{U}^2} \right) \quad [6]$$

$$P'(Z) = \frac{1}{2} \rho C \bar{U}^2 \left( 2 \frac{U'}{\bar{U}} + \frac{U'^2 - \overline{U'^2}}{\bar{U}^2} \right) \quad [7]$$

Despreciando los segundos términos de los paréntesis:

$$\bar{P}(Z) = \frac{1}{2} \rho C \bar{U}^2 \quad [8]$$

$$P'(Z) = \rho C \bar{U} U' \quad [9]$$

La última ecuación permite expresar la densidad espectral de la presión como:

$$S_p = \rho^2 C^2 \bar{U}^2 S_U \quad [10]$$

Si las dimensiones de la construcción no permiten considerarla como puntual, es necesario conocer la densidad espectral cruzada de la presión de viento en dos puntos de la misma, es decir, hay que conocer la medida en que dos registros de velocidad de viento en puntos distintos  $A_1$  y  $A_2$  están correlacionados.

Lo anterior no es más que la expresión analítica de una realidad física evidente. Como ya se ha expuesto, la turbulencia viene dada por los remolinos que avanzan con la corriente. Si el tamaño medio de dichos remolinos es muy superior al del edificio, la presión en todos los puntos será, en cada instante de tiempo, similar. Si, por el contrario, el tamaño es menor, apenas existirá relación alguna entre las presiones de distintos puntos.

La base experimental existente muestra una situación intermedia entre las expuestas. Existe cierta continuidad en la energía de los remolinos de tal forma que los de menor tamaño giran con mayor velocidad produciendo puntas de presión muy altas pero localizadas en áreas reducidas.

Estas sobrepresiones son muy importantes en el proyecto de los cerramientos pero su incidencia en la resultante global de arrastre sobre el edificio es menor ya que al sumar presiones sobre todo el edificio las sobre/subpresiones locales se compensan en parte. Esto es debido a que en general el tamaño del edificio supera al de los remolinos causantes de la componente fluctuante de la presión.

Esto justifica la aparente contradicción entre las velocidades de viento que en repetidas ocasiones recogen los medios periodísticos (es ya típica la frase ... "fuertes tormentas con vientos de mas de 100 km/h"... ) y las propuestas por la normativa (según la vigente norma de acciones, 100 km/h es acción característica para edificios de menos de 10 m de altura, lo que implica que tan solo existe una probabilidad del 2% de que se sobrepase en un año).

Naturalmente, la variación espacial de presión inducida por los remolinos tiene un paralelo claro en la variación temporal. La acción de los remolinos es relativamente rápida (rara vez duran más de uno o dos minutos). Para hallar el valor medio de presión al que se hacía referencia en el párrafo anterior bastaría con promediar los registros

The above is little more than the analytical expression of an obvious physical reality. As discussed above, turbulence is caused by the vortices that advance with the stream. If the size of such vortices is much larger than the building, the pressure on all points will be similar at any given time. If, by contrast, the vortices are smaller than the structure in question, the pressure exerted on different points will be barely if at all related.

The existing experimental evidence points to a situation midway between the above two extremes. There is some continuity in vortex energy, whereby the smaller ones spin faster, producing very high pressure areas relatively small in size.

These overpressures are very important when designing enclosures but their impact on the global drag force on the building is minor, since when all the pressures on the entire building are summed, local over/subpressures partially offset one another. This is due to the fact that in general the building is larger than the vortices producing the fluctuating component of pressure. This justifies the apparent contradiction between wind speeds so often reported in the media (where statements such as "strong storms with winds of over 100 km/h" are typical...) and the speeds set out in the regulations (according to the existing code on wind action, 100 km/h is a characteristic value for buildings less than 10 m tall, which implies that the likelihood of stronger winds in a year's time is only 2%).

Naturally, the spatial variation of pressure induced by vortices has an obvious parallel in time. Vortex action is relatively short-lived (rarely lasting for over one or two minutes). To find the mean pressure value referred in the preceding paragraph it would suffice to average the time values recorded over intervals lasting slightly more than a few minutes (normally 10, although the results are not greatly changed when much larger weighting intervals are used).

In any case, coming back to points  $A_1$  and  $A_2$ , assuming homogeneous turbulence, cross-spectral density depends on the distance  $r$  between the two points but not on the absolute position of each. In general, the complex function would be expressed as follows:

$$S_{A_1, A_2} = S_{A_1, A_2}^C + i S_{A_1, A_2}^Q \quad [11]$$

The real and imaginary parts of the function are known as "cospectrum" and "quadrature spectrum", respectively. Experimental evidence points to the scant importance of the latter, which is generally neglected.

The cross correlation between two points is often represented via an experimental result-fitting function known as the coherence function:

$$\text{Coh} = e^{-\hat{f}} \quad [12]$$

where

$$\hat{f} = \frac{n [C_Z^2 (Z_1 - Z_2)^2 + C_Y^2 (Y_1 - Y_2)^2]^{1/2}}{\frac{1}{2} \{ \bar{U}(Z_1) + \bar{U}(Z_2) \}} \quad [13]$$

where  $C_Z$  and  $C_Y$  are the so-called exponential decrement coefficients.

The coherence function is related to the cross spectrum as shown in the following equation:

$$\text{Coh}_{Z_1, Z_2} = \left\{ \frac{[S_{Z_1, Z_2}^C]^2 + [S_{Z_1, Z_2}^Q]^2}{S_{Z_1} S_{Z_2}} \right\}^{1/2} \quad [14]$$

In virtue whereof, and neglecting the quadrature, the cospectrum can be expressed as:

$$S_{Z_1, Z_2}^C = \text{Coh}_{Z_1, Z_2} S_{Z_1}^{1/2} S_{Z_2}^{1/2} \quad [15]$$

The figures attached (figs. 12 and 13) graphically depict the shape of the coherence function for different frequencies. In both cases the values plotted are the function values in a 10-m square vertical area (projected off in the figure for greater clarity) whose centre is at a height of 10 m. In the first case vortex frequency was assumed to be 0.1 Hz and in the second 1 Hz. It is readily observed that the increased frequency reduces the correlation between pressures. At each point in time the fluctuating component of the pressure that acts on a given point bears no relation whatsoever to the pressure on any other point at a distance of more than 1 or 2 m.

#### 4. CALCULATING THE RESPONSE OF SLENDER PRISMATIC BUILDINGS TO GUSTS OF WIND

One important aspect of the fluctuating pressure is its dynamic effect on slender buildings.

Indeed, assume the action of a gust of wind consisting of a half-wave with a duration of 5 seconds, during which wind speed starts at zero, reaches its peak and then subsides.

When such an idealised gust of wind acts on a normal building with a natural fundamental period of around 0.5 seconds, building displacement simply reacts statically to excitation. The inertia and damping forces are negligible and the system can be resolved by dividing force by rigidity.



**Fig. 5: Distribución de velocidades**  
**Fig. 5: Distribution of speed**



**Fig. 6: Chimenea metálica**  
**Fig. 6: Metal chimney stack**

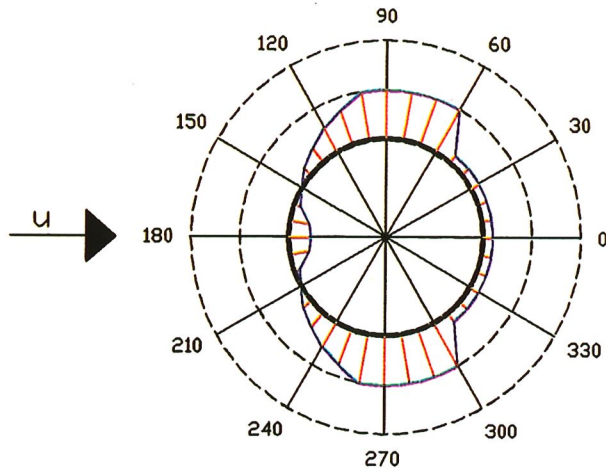
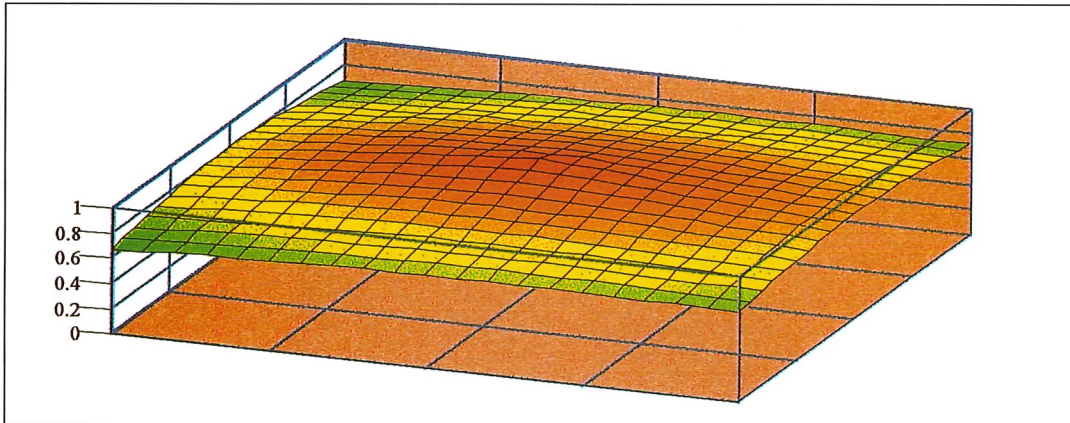
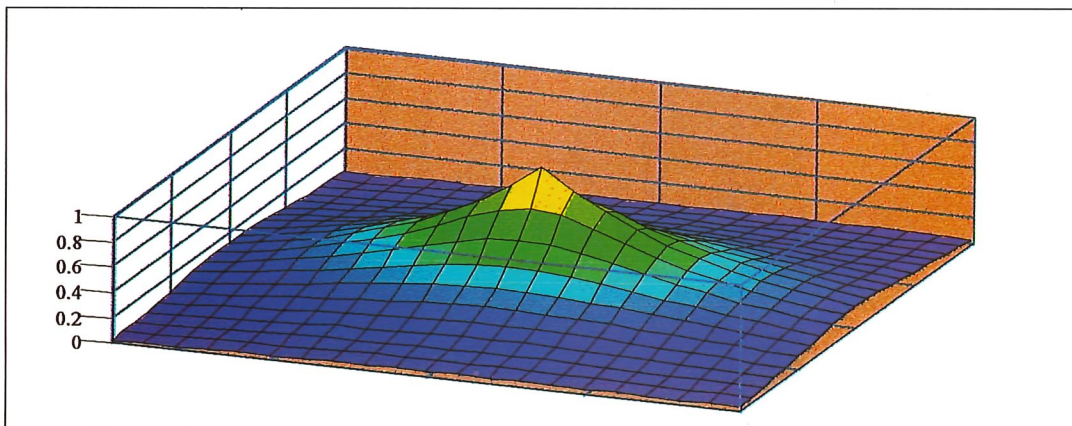


Fig. 8: Distribución de presiones  
 Fig. 8: Distribution of pressures



M

Fig. 12: Función de coherencia para una frecuencia de las rachas de viento de 0.1 Hz  
 Fig. 12: Coherence function for gust of wind with a frequency of 0.1 Hz



M

Fig. 13: Función de coherencia para una frecuencia de las rachas de viento de 1 Hz  
 Fig. 13: Coherence function for gust of wind with a frequency of 1 Hz

temporales en intervalos superiores a algunos minutos (normalmente 10, aunque no existe gran diferencia en el resultado de emplear intervalos de ponderación muy superiores).

En todo caso, volviendo a los dos puntos  $A_1$  y  $A_2$ , y asumiendo turbulencia homogénea, la densidad espectral cruzada depende de la distancia  $r$  entre los puntos y no de la posición absoluta de cada uno. En general, tendrá formato de función imaginaria:

$$S_{A_1, A_2} = S_{A_1, A_2}^C + iS_{A_1, A_2}^Q \quad [11]$$

Las partes real e imaginaria se conocen como "coespectro" y "espectro en cuadratura". La observación experimental muestra la escasa importancia de este último, que generalmente se desprecia.

Es corriente representar la correlación cruzada entre dos puntos mediante una función de ajuste de resultados experimentales denominada coherencia:

$$\text{Coh} = e^{-\hat{f}} \quad [12]$$

siendo

$$\hat{f} = \frac{n [C_Z^2 (Z_1 - Z_2)^2 + C_Y^2 (Y_1 - Y_2)^2]^{1/2}}{\frac{1}{2} \{ \bar{U}(Z_1) + \bar{U}(Z_2) \}} \quad [13]$$

donde  $C_Z$  y  $C_Y$  son los denominados coeficientes de caída exponencial.

La función de coherencia esta relacionada con el espectro cruzado mediante la ecuación:

$$\text{Coh}_{Z_1, Z_2} = \left\{ \frac{[S_{Z_1, Z_2}^C]^2 + [S_{Z_1, Z_2}^Q]^2}{S_{Z_1} S_{Z_2}} \right\}^{1/2} \quad [14]$$

Por lo que despreciando la cuadratura, el coespectro se puede expresar como:

$$S_{Z_1, Z_2}^C = \text{Coh}_{Z_1, Z_2} S_{Z_1}^{1/2} S_{Z_2}^{1/2} \quad [15]$$

En las figuras adjuntas (figs. 12 y 13) se puede apreciar gráficamente la forma de la función de coherencia para distintas frecuencias. En ambos casos se dibujan los valores que adopta en una superficie cuadrada de 10 m de lado orientada verticalmente (se representa abatida para una mejor apreciación) y con su centro situado a 10 m de altura. En el primer caso se ha supuesto un remolino de 0.1 Hz de frecuencia y en el segundo de 1 Hz. Se observa claramente cómo el aumento de la frecuencia disminuye la correlación entre presiones. En cada instante la parte fluctuante de la presión que actúa en un punto dado no guarda relación alguna con la que actúa en cualquier otro punto situado a más de 1 ó 2 m de distancia.

#### 4. CALCULO DE LA RESPUESTA DE EDIFICIOS PRISMÁTICOS ESBELTOS FRENTE A LAS RACHAS DE VIENTO

Un aspecto importante de la parte fluctuante de la presión es su caracter dinámico cuando actúa sobre edificios esbeltos.

En efecto, supóngase la acción de la ráfaga consistente en una semionda que actúa durante 5 segundos, en los cuales arranca desde un valor nulo, alcanza su máximo y se anula de nuevo.

Cuando la ráfaga así idealizada actúa sobre un edificio normal, con un periodo fundamental en torno 0.5 segundos, el desplazamiento de tal edificio simplemente sigue la excitación en forma estática. Las fuerzas de inercia y amortiguamiento resultan despreciables y el sistema se resuelve dividiendo la fuerza por la rigidez.

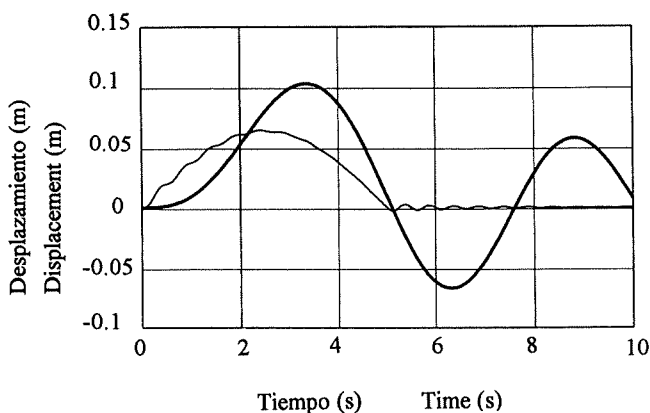


Fig. 14: Respuesta dinámica del edificio frente a una racha de viento de frecuencia similar a la propia de la estructura.

Fig. 14: Dynamic response of the building to a gust of wind with a frequency similar to the natural frequency of the structure itself.

Cuando el período fundamental del edificio se acerca al de la excitación, y en la Figura 14 se representa el caso de un período de 5 segundos, la respuesta es ya dinámica. Las fuerzas de inercia son muy importantes y se produce una amplificación clara del desplazamiento.

As the fundamental period of the building approaches the fundamental period of excitation - and Figure 14 shows such a case for a 5-second period - the response becomes dynamic. Inertia forces are very important and building displacement much more pronounced.

The windward response of prismatic buildings can be found by applying stochastic process analysis methods, when the wind direction is transverse to one of the sides.

The basic purpose of this kind of methods is to identify the parameters that define the output signal of a system, from which the input signal and the system itself can be identified.

In the case under consideration, the output signal is displacement at any point of the building, defined by its spectral density function, the input signal is the pressure at all points (or, equivalently, the spectral and cross-spectral densities) and the system is defined by the distributions of rigidity, mass and damping.

Naturally, only the response to the fluctuating component of the pressures is analysed (conventional static calculation suffices for the stationary part).

Take the structure in Figure 15.

If the upwind and downwind sides are divided into identical rectangular elements as indicated in Fig. 16 and it is assumed that the cross correlation of forces  $F^k$  and  $F^j$  is the cross correlation for pressure in the centre of the elements multiplied by the respective areas of influence, the spectral density of the displacement of each point can be expressed as follows:

$$S_x^m = \sum_{\ell=1}^G \sum_{p=1}^G \frac{\phi_{\ell}^m \phi_p^m \rho^2}{16\pi^4 M_{\ell} M_p n_{\ell}^2 n_p^2} \Psi_{\ell p} \sum_{k=1}^R \sum_{j=1}^R a^k a^j [C_B^k C_B^j + C_S^k C_S^j + N(n) (C_B^k C_S^j + C_B^j C_S^k)] \bar{U}^k \bar{U}^j S_u^{1/2}(z_k, n) S_u^{1/2}(z_j, n) e^{-\hat{f} \phi_{\ell}^k \phi_p^j} \quad [16]$$

Reference (3) contains a detailed discussion of the deduction of this expression, in which  $\phi$  is the value of the mode of vibration in the respective point,  $n$  with a subscript is the frequency of the mode of vibration and without the subscript it is the variable,  $a$  is the area of the element,  $G$  and  $R$  the number of modes of vibration considered and elements into which the facade is divided, respectively,  $C_B$  and  $C_S$  are the mean pressure coefficients for the upwind and downwind elements, respectively and  $N(n)$  is an empirical function that weights the cross correlation between points located on different sides.  $M$  and  $\Psi_{LP}$  are found using the following expressions:

$$M_j = \hat{\phi}_j^T \tilde{m} \hat{\phi}_j \quad [17]$$

$$\Psi_{\ell p} = \frac{[1 - (\frac{n}{n_{\ell}})^2][1 - (\frac{n}{n_p})^2] + [2\zeta_{\ell}(\frac{n}{n_{\ell}})][2\zeta_p(\frac{n}{n_p})]}{\{[1 - (\frac{n}{n_{\ell}})^2]^2 + [2\zeta_{\ell}(\frac{n}{n_{\ell}})]^2\} \{[1 - (\frac{n}{n_p})^2]^2 + [2\zeta_p(\frac{n}{n_p})]^2\}} \quad [18]$$

where  $\zeta$  is the damping rate of the respective mode.

The symmetry of the summations makes it possible to halve the number of terms with different index, whereby expression [16] simplifies to:

$$S_x^m = \sum_{\ell=1}^G \sum_{p=\ell}^G \frac{2\delta \phi_{\ell}^m \phi_p^m \rho^2}{16\pi^4 M_{\ell} M_p n_{\ell}^2 n_p^2} \Psi_{\ell p} \sum_{k=1}^R \sum_{j=k}^R a^k a^j [C_B^k C_B^j + C_S^k C_S^j + N(n) (C_B^k C_S^j + C_B^j C_S^k)] \bar{U}^k \bar{U}^j S_u^{1/2}(z_k, n) S_u^{1/2}(z_j, n) e^{-\hat{f} \delta (\phi_{\ell}^k \phi_p^j + \phi_{\ell}^j \phi_p^k)} \quad [19]$$

where  $\delta$  is assigned the values of 0.5 or 1 for terms with the same or different index, respectively.

Mediante la aplicación de los métodos de análisis de procesos estocásticos es posible obtener la respuesta en la dirección del viento de edificios prismáticos cuando este incide perpendicularmente sobre una de las fachadas.

El objetivo básico en este tipo de métodos es identificar los parámetros que definen la señal de salida de un sistema a partir de los que identifican la señal de entrada y el propio sistema.

En el caso considerado, la señal de salida será el desplazamiento de cualquier punto del edificio, definida por su función de densidad espectral, la de entrada las presiones en todos los puntos (o, lo que es igual, la densidad espectral y la cruzada) y el sistema quedará definido por las distribuciones de rigidez, masa y amortiguamiento.

Naturalmente, se analiza tan solo la respuesta a la parte fluctuante de las presiones (para la estacionaria basta un cálculo estático convencional).

Sea la estructura de la Figura 15.

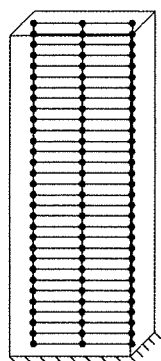


Fig. 15: Modelo de estructura  
Fig. 15: Structure model

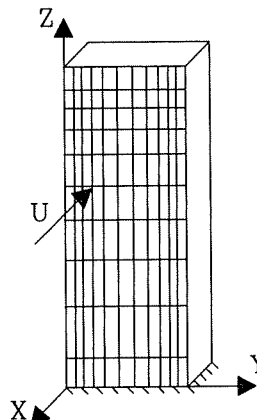


Fig. 16.- Divisiones de la fachada  
Fig. 16: Side divisions

Si se dividen las fachadas a barlovento y sotavento en elementos idénticos y rectangulares de la forma indicada en la Fig. 16 y se supone que la correlación cruzada entre las fuerzas  $F^k F^j$ , es la correlación cruzada para la presión en el centro de los elementos multiplicada por las respectivas áreas de influencia, se puede describir la densidad espectral del desplazamiento en cada punto mediante la expresión :

$$S_x^m = \sum_{\ell=1}^G \sum_{p=1}^G \frac{\phi_{\ell}^m \phi_p^m \rho^2}{16\pi^4 M_{\ell} M_p n_{\ell}^2 n_p^2} \Psi_{\ell p}$$

$$\sum_{k=1}^R \sum_{j=1}^R a^k a^j [C_B^k C_B^j + C_S^k C_S^j + N(n) (C_B^k C_S^j + C_B^j C_S^k)]$$

$$\bar{U}^k \bar{U}^j S_u^{1/2}(z_k, n) S_u^{1/2}(z_j, n) e^{-\hat{f} \phi_{\ell}^k \phi_p^j}$$
[16]

expresión cuya deducción se desarrolla en la referencia (3) y donde  $\phi$  es el valor del modo de vibración en el punto correspondiente,  $n$  cuando lleva subíndice es la frecuencia del modo de vibración y cuando no lo lleva es la variable, a el área del elemento,  $G$  y  $R$  el número de modos de vibración considerados y de elementos en que se ha dividido la fachada respectivamente,  $C_B$  y  $C_S$  son los coeficientes de presión media para el elemento a barlovento y sotavento respectivamente y  $N(n)$  es una función empírica que pondera la correlación cruzada entre puntos situados en distintas fachadas.  $M$  y  $\Psi_{Lp}$  se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$M_j = \hat{\phi}_j^T \tilde{m} \hat{\phi}_j$$
[17]

$$\Psi_{\ell p} = \frac{[1 - (\frac{n}{n_{\ell}})^2] [1 - (\frac{n}{n_p})^2] + [2\zeta_{\ell} (\frac{n}{n_{\ell}})] [2\zeta_p (\frac{n}{n_p})]}{\{ [1 - (\frac{n}{n_{\ell}})^2]^2 + [2\zeta_{\ell} (\frac{n}{n_{\ell}})]^2 \} \{ [1 - (\frac{n}{n_p})^2]^2 + [2\zeta_p (\frac{n}{n_p})]^2 \}}$$
[18]

donde  $\zeta$  es el índice de amortiguamiento del modo correspondiente.

It is interesting to note that using this method the elements which are of no relevance can be neglected simply by considering their upwind and downwind drag coefficients to be nil, thereby making it possible to model buildings with a rectangular section and non-rectangular sides.

Once the spectral density of the process is found, any statistical parameter can be deduced. Specifically, the variances of speed and acceleration are as follows:

$$\sigma_{\dot{x}}^2(z_m, Y_M) = 4\pi^2 \int_0^\infty n^2 S_x^m(z_m, Y_m) dn \quad [20]$$

$$\sigma_{\ddot{x}}^2(z_m, Y_M) = 16\pi^4 \int_0^\infty n^4 S_x^m(z_m, Y_m) dn \quad [21]$$

If we assume a random Gaussian process (definition and properties set out in reference (14)), the peak distribution variable  $X_m$  can be used, whose mean is:

$$E[X_m] = (C_1 + \frac{0.5772}{C_1}) \sigma_x \quad [22]$$

where

$$C_1 = [2\text{Ln}(N_x^+(0)T)]^{1/2} \quad [23]$$

and:

$$N_x^+(0) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{\dot{x}}}{\sigma_x} \quad [24]$$

The factor in parenthesis in expression [22] is the G peak factor. The peak factor for speed and acceleration can also be found through iterative application of expression [20], along with the expected maxima for these two random processes, which may be of particular interest when engineering for building conditions of service.

The variance of displacement is:

$$\sigma_x^2(Z_m, Y_m) = \frac{\rho^2 H^4 A^2}{16\pi^4 M^2} \sum_{\ell=1}^G \sum_{p=\ell}^G \frac{2\delta\phi_\ell^m \phi_p^m}{m_\ell m_p f_\ell^2 f_p^2}$$

$$\int_0^\infty \Psi_{\ell p} \sum_{k=1}^R \sum_{j=k}^R A^k A^j [C_B^k C_B^j + C_S^k C_S^j + N(f) (C_B^k C_S^j + C_B^j C_S^k)] \quad [25]$$

$$\hat{U}^k \hat{U}^j \left[ \frac{S_u(z_k, n)n}{U_* f} \frac{S_u(z_j, n)n}{U_* f} \right]^{1/2}$$

$$\text{coh}(\hat{y}_k, \hat{y}_j, \hat{z}_k, \hat{z}_j, f) \delta(\phi_\ell^k \phi_p^j + \phi_\ell^j \phi_p^k) df$$

where  $\hat{z} = z/H$ ,  $\hat{y} = y/H$ ,  $f = nH/U_*$ ,  $\hat{U} = \bar{U}/U_*$ ,  $m_\ell = M_\ell/M$ ,  $A^k = a^k/A$ .  $U_*$  is the friction velocity, H and M are the height and mass of the building, respectively and A is the area of the side of the structure.

New functions are defined as follows:

$$\Psi_{\ell p} = \frac{[1 - (\frac{f}{f_\ell})^2] [1 - (\frac{f}{f_p})^2] + [2\zeta_\ell (\frac{f}{f_\ell})] [2\zeta_p (\frac{f}{f_p})]}{\{ [1 - (\frac{f}{f_\ell})^2]^2 + [2\zeta_\ell (\frac{f}{f_\ell})]^2 \} \{ [1 - (\frac{f}{f_p})^2]^2 + [2\zeta_p (\frac{f}{f_p})]^2 \}} \quad [26]$$



La simetría de los sumatorios permite reducir el número de sumandos que tienen distinto índice a la mitad quedando la expresión [16] como sigue:

$$S_x^m = \sum_{\ell=1}^G \sum_{p=\ell}^G \frac{2\delta \phi_{\ell}^m \phi_p^m \rho^2}{16\pi^4 M_{\ell} M_p n_{\ell}^2 n_p^2} \Psi_{\ell p}$$

$$\sum_{k=1}^R \sum_{j=k}^R a^k a^j [C_B^k C_B^j + C_S^k C_S^j + N(n) (C_B^k C_S^j + C_B^j C_S^k)]$$

$$\bar{U}^k \bar{U}^j S_u^{1/2}(z_k, n) S_u^{1/2}(z_j, n) e^{-f} \delta(\phi_{\ell}^k \phi_p^j + \phi_{\ell}^j \phi_p^k)$$
[19]

donde  $\delta$  toma valores 0.5 y 1 para sumandos de que tienen igual y distinto índice respectivamente.

Es interesante observar que con este método se pueden eliminar aquellos elementos que no interesen sin más que hacer nulos sus coeficientes de arrastre a barlovento y sotavento, lo que permite modelizar también edificios de sección rectangular cuya fachada no sea un rectángulo.

Una vez obtenida la densidad espectral del proceso es posible deducir cualquier parámetro estadístico. En concreto, las varianzas de la velocidad y aceleración resultan:

$$\sigma_x^2(z_m, y_m) = 4\pi^2 \int_0^{\infty} n^2 S_x^m(z_m, y_m) dn$$
[20]

$$\sigma_{\ddot{x}}^2(z_m, y_m) = 16\pi^4 \int_0^{\infty} n^4 S_x^m(z_m, y_m) dn$$
[21]

Si suponemos que se trata de un proceso aleatorio gaussiano (su definición y propiedades se puede encontrar en la referencia (14)) se puede utilizar la variable  $X_m$  de distribución de máximos que tiene por media:

$$E[X_m] = (C_1 + \frac{0.5772}{C_1}) \sigma_x$$
[22]

donde:

$$C_1 = [2 \text{Ln}(N_x^+(0)T)]^{1/2}$$
[23]

siendo:

$$N_x^+(0) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{\ddot{x}}}{\sigma_x}$$
[24]

El factor entre paréntesis de la expresión [22] es el factor de pico G. Mediante una aplicación recurrente de la expresión [20] se puede hallar el factor de pico también para la velocidad y aceleración, así como la esperanza para el máximo de estos dos procesos aleatorios que pueden ser interesantes especialmente en el cálculo de condiciones de servicio de los edificios.

La varianza del desplazamiento es:

$$\sigma_x^2(z_m, y_m) = \frac{\rho^2 H^4 A^2}{16\pi^4 M^2} \sum_{\ell=1}^G \sum_{p=\ell}^G \frac{2\delta \phi_{\ell}^m \phi_p^m}{m_{\ell} m_p f_{\ell}^2 f_p^2}$$

$$\int_0^{\infty} \Psi_{\ell p} \sum_{k=1}^R \sum_{j=k}^R A^k A^j [C_B^k C_B^j + C_S^k C_S^j + N(f) (C_B^k C_S^j + C_B^j C_S^k)]$$

$$\hat{U}^k \hat{U}^j \left[ \frac{S_u(z_k, n) n}{U_{*f}} \frac{S_u(z_j, n) n}{U_{*f}} \right]^{1/2}$$

$$\text{coh}(\hat{y}_k, \hat{y}_j, \hat{z}_k, \hat{z}_j, f) \delta(\phi_{\ell}^k \phi_p^j + \phi_{\ell}^j \phi_p^k) df$$
[25]

donde  $\hat{z} = z/H$ ,  $\hat{y} = y/H$ ,  $f = nH/U_*$ ,  $\hat{U} = \bar{U}/U_*$ ,  $m_{\ell} = M_{\ell}/M$ ,  $A^k = a^k/A$ .  $U_*$  es la velocidad de fricción, H y M son la altura y masa del edificio respectivamente y A es el área de la fachada.

$$\Gamma_{tp} = \sum_{k=1}^R \sum_{j=k}^R A^k A^j [C_B^k C_B^j + C_S^k C_S^j + N(n) (C_B^k C_S^j + C_B^j C_S^k)]$$

$$\hat{U}^k \hat{U}^j \left[ \frac{S_u(z_k, n) n}{U_* f} \frac{S_u(z_j, n) n}{U_* f} \right]^{1/2} \text{coh}(\hat{Y}_k, \hat{Y}_j, \hat{Z}_k, \hat{Z}_j, n) \delta(\phi_\ell^k \phi_p^j + \phi_\ell^j \phi_p^k) \quad [27]$$

$$I_{tpr} = \int_0^\infty f^{2r} \Psi_{tpr}(f) \Gamma_{tp}(f) df \quad [28]$$

$$J_r(Z_m, Y_m) = \left[ \sum_{\ell=1}^G \sum_{p=\ell}^G \frac{2\delta \phi_\ell^m \phi_p^m I_{tpr}}{f_\ell^2 f_p^2 m_\ell m_p} \right]^{1/2} \quad [29]$$

Subscript  $r$  in expressions [28] and [29] indicates that these functions correspond to the displacement, velocity, acceleration or derivative of the acceleration of the building response for subscript values 0, 1, 2 and 3, respectively. Using these functions, expressions are readily found for the standard deviations and the expected rate of crossing with the time axis for the above-mentioned response values:

$$\sigma_x(z'_m, y'_m) = J_0(z'_m, y'_m) \frac{\rho H^2 A}{4\pi^2 M} \quad [30]$$

$$\sigma_{\dot{x}}(z'_m, y'_m) = J_1(z'_m, y'_m) \frac{\rho H A U_*}{2\pi M} \quad [31]$$

$$\sigma_{\ddot{x}}(z'_m, y'_m) = J_2(z'_m, y'_m) \frac{\rho A U_*^2}{M} \quad [32]$$

$$\sigma_{\ddot{\ddot{x}}}(z'_m, y'_m) = J_3(z'_m, y'_m) \frac{\rho A U_*^3}{M H} \quad [33]$$

$$N_x^+(0) = \frac{J_1(z'_m, y'_m) U_*}{J_0(z'_m, y'_m) H} \quad [34]$$

$$N_{\dot{x}}^+(0) = \frac{J_2(z'_m, y'_m) U_*}{J_0(z'_m, y'_m) H} \quad [35]$$

$$N_{\ddot{x}}^+(0) = \frac{J_3(z'_m, y'_m) U_*}{J_0(z'_m, y'_m) H} \quad [36]$$

The assumptions made in the above development are as follows:

- The fluctuation of speed in the direction of the flow was considered to be a random, stationary Gaussian process.
- The imaginary component of the spatial correlation of the fluctuation component of speed was neglected.
- The imaginary terms of the product of transfer functions were neglected.
- The inertial terms for calculating wind pressure were neglected.
- Certain minor terms were neglected in the relationship between pressure and speed.

Se definen las siguientes nuevas funciones:

$$\Psi_{lp} = \frac{[1 - (\frac{f}{f_\ell})^2] [1 - (\frac{f}{f_p})^2] + [2\zeta_\ell (\frac{f}{f_\ell})] [2\zeta_p (\frac{f}{f_p})]}{\{[1 - (\frac{f}{f_\ell})^2]^2 + [2\zeta_\ell (\frac{f}{f_\ell})]^2\} \{[1 - (\frac{f}{f_p})^2]^2 + [2\zeta_p (\frac{f}{f_p})]^2\}} \quad [26]$$

$$\Gamma_{lp} = \sum_{k=1}^R \sum_{j=k}^R A^k A^j [C_B^k C_B^j + C_S^k C_S^j + N(n) (C_B^k C_S^j + C_B^j C_S^k)]$$

$$\hat{U}^k \hat{U}^j \left[ \frac{S_u(z_k, n) S_u(z_j, n)}{U_* f} \right]^{1/2}$$

$$\text{coh} (\hat{Y}_k, \hat{Y}_j, \hat{Z}_k, \hat{Z}_j, n) \delta (\phi_\ell^k \phi_p^j + \phi_\ell^j \phi_p^k) \quad [27]$$

$$I_{lpr} = \int_0^\infty f^{2r} \Psi_{lp}(f) \Gamma_{lp}(f) df \quad [28]$$

$$J_r(Z_m, Y_m) = \left[ \sum_{\ell=1}^G \sum_{p=\ell}^G \frac{2\delta \phi_\ell^m \phi_p^m I_{lpr}}{f_\ell^2 f_p^2 m_\ell m_p} \right]^{1/2} \quad [29]$$

El subíndice r, en las expresiones [28] y [29] indica que esas funciones corresponden al desplazamiento, velocidad, aceleración o derivada de la aceleración de la respuesta del edificio para los valores 0, 1, 2, y 3 respectivamente de este subíndice. Usando estas funciones, es fácil encontrar las expresiones de las desviaciones típicas y de las medias de cruces por unidad de tiempo con el eje de tiempos para los valores de la respuesta mencionados anteriormente, resultando las siguientes expresiones:

$$\sigma_x(z'_m, y'_m) = J_0(z'_m, y'_m) \frac{\rho H^2 A}{4\pi^2 M} \quad [30]$$

$$\sigma_{\dot{x}}(z'_m, y'_m) = J_1(z'_m, y'_m) \frac{\rho H A U_*}{2\pi M} \quad [31]$$

$$\sigma_{\ddot{x}}(z'_m, y'_m) = J_2(z'_m, y'_m) \frac{\rho A U_*^2}{M} \quad [32]$$

$$\sigma_{\ddot{x}'}(z'_m, y'_m) = J_3(z'_m, y'_m) \frac{\rho A U_*^3}{M H} \quad [33]$$

$$N_x^+(0) = \frac{J_1(z'_m, y'_m) U_*}{J_0(z'_m, y'_m) H} \quad [34]$$

$$N_{\dot{x}}^+(0) = \frac{J_2(z'_m, y'_m) U_*}{J_0(z'_m, y'_m) H} \quad [35]$$

$$N_{\ddot{x}}^+(0) = \frac{J_3(z'_m, y'_m) U_*}{J_0(z'_m, y'_m) H} \quad [36]$$

Las hipótesis asumidas en el desarrollo anterior son las siguientes:

## 5. EXAMPLE

A computer programme was written with the above method to obtain the in-service response of prismatic buildings with a rectangular cross section subjected to wind action perpendicular to one of the sides. To take account of the fact that the coherence value may vary greatly in any given element (as discussed in the preceding section), a second level of discretisation was used, consisting of calculating the correlation within each element by dividing it, in turn, into smaller elements.

The example consisted of engineering a 50-storey building that was modelled as a procture with the mass concentrated on each storey. The side of the structure was discretised as shown in Figure 17.

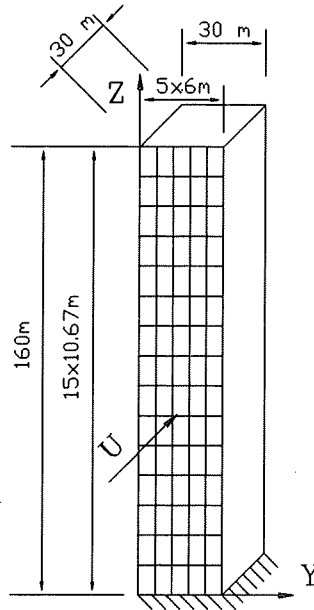


Fig. 17: Discretización de las fachadas  
Fig. 17: Discretisation of sides of structure

The response was calculated for ground roughness values of 0.01 m and 1 m, following the classification set out in Eurocode 1, and for mean speeds at a height of 20 m of 31.01 m/s and 17.26 m/s, respectively. The response was likewise computed following the indications laid down in Eurocode 1. The results obtained are shown in figures 18 to 23.

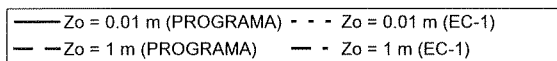
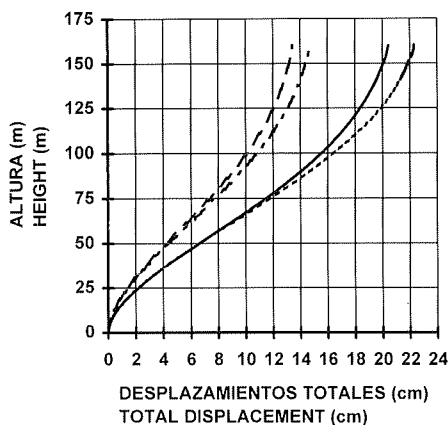


Fig. 18

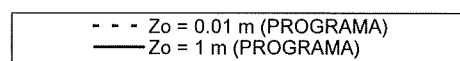
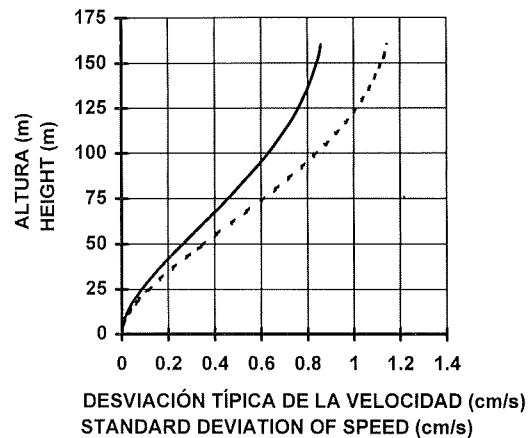


Fig. 19

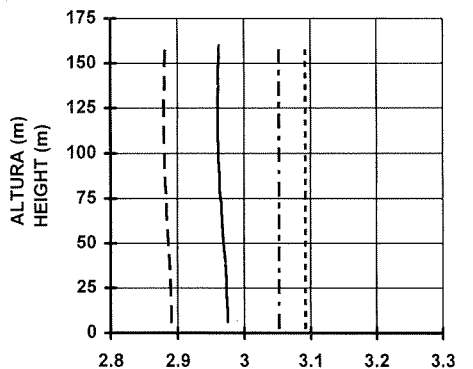
- a) La fluctuación de la velocidad en la dirección del flujo se ha considerado como un proceso aleatorio estacionario y gaussiano.
- b) No se ha considerado la componente imaginaria de la correlación espacial de la fluctuación de la velocidad.
- c) No se han considerado los términos imaginarios del producto de funciones de transferencia.
- d) Se han despreciado los términos inerciales para el cálculo de la presión de viento.
- e) En la relación entre presión y velocidad se han despreciado algunos términos de pequeña contribución.

## 5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el método expuesto en el apartado anterior se ha realizado un programa de ordenador para obtener la respuesta en servicio de edificios prismáticos de sección rectangular sometidos a la acción de viento en dirección perpendicular a una de las fachadas. Para tener en cuenta que la función de coherencia puede tomar valores muy distintos dentro de un mismo elemento (como vimos en el apartado anterior) se utiliza un segundo nivel de discretización que consiste en calcular la correlación dentro de cada elemento dividiendo este en elementos más pequeños.

El ejemplo calculado es un edificio de 50 plantas que se ha modelado como un voladizo con la masa concentrada en cada planta. La discretización empleada en la fachada se muestra en la Figura 17.

Se ha calculado la respuesta para unas rugosidades del suelo de 0.01 m y 1 m que son los valores extremos de la clasificación hecha por el Eurocódigo 1 y para unas velocidades medias a una altura de 20 m de 31.01 m/s y 17.26 m/s respectivamente que corresponden a un mismo periodo de retorno de 50 años. También se ha calculado esta respuesta siguiendo las indicaciones del Eurocódigo 1. En las figuras 18 a 23 se muestran los resultados obtenidos.



FACTORES DE PICO DEL DESPLAZAMIENTO  
DISPLACEMENT PEAK FACTORS

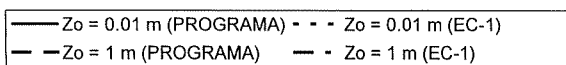
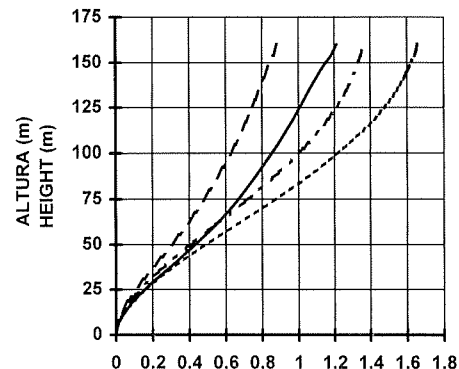


Fig. 20



DESVIACIÓN TÍPICA DE LA ACELERACIÓN ( $\text{cm/s}^2$ )  
STANDARD DEVIATION OF ACCELERATION ( $\text{cm/s}^2$ )

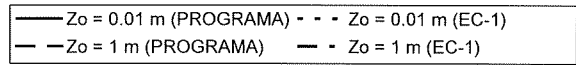
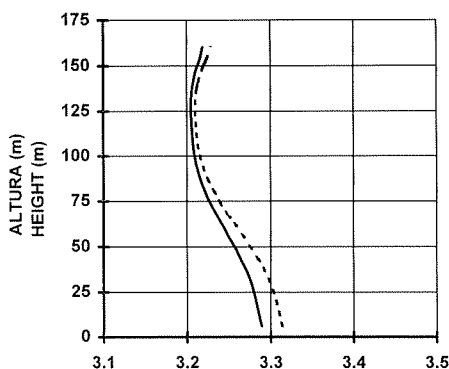


Fig. 21



FACTORES DE PICO DE LA VELOCIDAD  
SPEED PEAK FACTORS

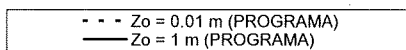
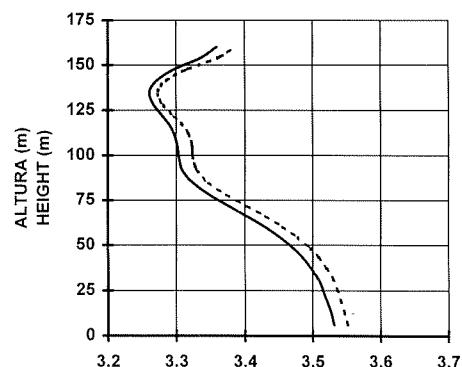


Fig. 22



FACTORES DE PICO DE LA ACELERACIÓN  
ACCELERATION PEAK FACTORS

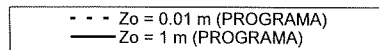


Fig. 23

---

The following conclusions may be drawn from an analysis of the results:

Peak factors remain virtually constant at all values of ground roughness and building height.

The values obtained using the Eurocode 1 procedure are significantly higher than the ones yielded by the program, due primarily to the fact that the Eurocode, which includes certain parameter ranges that define the building, is, for this reason, skewed towards greater safety for any given specific case.

---

Del análisis de los resultados se extraen la siguientes conclusiones:

Los factores de pico se mantienen prácticamente constantes con la variación de la rugosidad del suelo y la altura del edificio.

Los valores obtenidos con el procedimiento del Eurocódigo 1 son en todos los casos superiores a los obtenidos con el programa, debido principalmente a que el método del Eurocódigo incluye expresiones aproximadas para la integración de la correlación y a que considera únicamente el primer modo de vibración de la estructura, mientras que en los cálculos realizados con el programa se han tenido en cuenta los tres primeros.

## REFERENCES:

1. Alarcón, E.; Hacar, M.A. Elementos de Dinámica Aplicada a las Estructuras, Madrid, 1971.
2. Ansys users manual, "Theoretical, procedures, elements, commands".
3. Arroyo, J.R.; Benito, J.J.; Alvarez, R. Análisis en Servicio de Edificios Altos ante la Acción de Viento. III International Congress of Numerical Methods in Engineering and Applied Sciences. Merida, Venezuela, (marzo, 1996).
4. Balendra, T. Vibration of Buildings to Wind and Earthquake loads, Springer-Verlag, 1993.
5. Benito, J. J. y Alvarez, R. "Análisis de la Influencia de Diversos Parámetros de Modelización de la Respuesta de una Estructura Esbelta a la Acción del Viento".
6. Bietry, J.; Sacré, C. and Simiu, E. "Mean Wind Profiles and Change of Terrain Roughness", Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 104, N° ST 10, (October, 1987).
7. Cook, N. J. The Designer's guide to Wind Loading of Building Structures, Butterworths, 1985.
8. Davenport, A. G. "Gust loading Factors", Journal Structures Div. ASCE, Vol. 93, N° ST 3, (June, 1967), PP 11-34.
9. ECCS "Recomendations for Calculating the Effects of Wind on Construction", second edition, 1987.
10. EUROCODE 1: Basis of design and actions on structures Part 2-4 "Actions on Structures-wind actions".
11. INTEMAC "Informe Sobre el Control del Análisis Aeroelástico del Puente del Centenario (Sevilla)". Emitido por INTEMAC en Julio de 1990.
12. Liu, H. Wind Engineering, Prentice Hall, 1991.
13. Newland, D. E. Vibraciones Aleatorias y Análisis Espectral, Editorial AC, 1983.
14. Nigan, N. C. Introduction to Random Vibrations, Mit Press, 1983.
15. Simiu, E and Scanlan, R. H. Wind Effects on Structures, second edition, Wiley-Interscience, 1986.
16. Simiu, E and Lozier, D. W. "The Buffeting of Tall Structures by Strong Winds", National Bureau of Standards, (Octubre, 1975).
17. Solari, G. "Alongwind Response Estimation: Closed Form Solution" Journal of the Structural Division. Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Vol. 108, N° ST 1, (January, 1982).
18. Solari, G. "Turbulence Modeling for Gust Loading", Journal of Structural Engineering, Vol. 113, N° 7, (July, 1987).
19. Taoka, G. T.; Hogan, M.; Khan, F. and Scanlan, R. H. "Ambient Response Analysis of Some Tall Structures", Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. ST 1, (January, 1975).
20. Vickery, B. J. and Kao, K. H. "Drag or Along-Wind Response of Slender Structures", Journal of the Structural Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, No. ST 1, (January, 1972).
21. Wianecki, J. "Securité des Structures Sous L'action du Vent", Annales de L'ITBTP, série EM/201 N° 434, (Mai, 1985).
22. Wianecki, J. et Chevallier, A. "Aerodynamique Effects du Vent", CEBTP, N° 475, (Juin-Juillet, 1989).



## BIBLIOGRAFIA:

1. Alarcón, E.; Hacar, M.A. Elementos de Dinámica Aplicada a las Estructuras, Madrid, 1971.
2. Ansys users manual, "Theoretical, procedures, elements, commands".
3. Arroyo, J.R.; Benito, J.J.; Alvarez, R. Análisis en Servicio de Edificios Altos ante la Acción de Viento. III International Congress of Numerical Methods in Engineering and Applied Sciences. Merida, Venezuela, (marzo, 1996).
4. Balendra, T. Vibration of Buildings to Wind and Earthquake loads, Springer-Verlag, 1993.
5. Benito, J. J. y Alvarez, R. "Análisis de la Influencia de Diversos Parámetros de Modelización de la Respuesta de una Estructura Esbelta a la Acción del Viento".
6. Bietry, J.; Sacré, C. and Simiu, E. "Mean Wind Profiles and Change of Terrain Roughness", Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 104, N° ST 10, (October, 1987).
7. Cook, N. J. The Designer's guide to Wind Loading of Building Structures, Butterworths, 1985.
8. Davenport, A. G. "Gust loading Factors", Journal Structures Div. ASCE, Vol. 93, N° ST 3, (June, 1967), PP 11-34.
9. ECCS "Recomendations for Calculating the Effects of Wind on Construction", second edition, 1987.
10. EUROCODE 1: Basis of design and actions on structures Part 2-4 "Actions on Structures-wind actions".
11. INTEMAC "Informe Sobre el Control del Análisis Aeroelástico del Puente del Centenario (Sevilla)". Emitido por INTEMAC en Julio de 1990.
12. Liu, H. Wind Engineering, Prentice Hall, 1991.
13. Newland, D. E. Vibraciones Aleatorias y Análisis Espectral, Editorial AC, 1983.
14. Nigan, N. C. Introduction to Random Vibrations, Mit Press, 1983.
15. Simiu, E and Scanlan, R. H. Wind Effects on Structures, second edition, Wiley-Interscience, 1986.
16. Simiu, E and Lozier, D. W. "The Buffeting of Tall Structures by Strong Winds", National Bureau of Standards, (Octubre, 1975).
17. Solari, G. "Alongwind Response Estimation: Closed Form Solution" Journal of the Structural Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Vol. 108, N° ST 1, (January, 1982).
18. Solari, G. "Turbulence Modeling for Gust Loading", Journal of Structural Engineering, Vol. 113, N° 7, (July, 1987).
19. Taoka, G. T.; Hogan, M.; Khan, F. and Scanlan, R. H. "Ambient Response Analysis of Some Tall Structures", Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. ST 1, (January, 1975).
20. Vickery, B. J. and Kao, K. H. "Drag or Along-Wind Response of Slender Structures", Journal of the Structural Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, No. ST 1, (January, 1972).
21. Wianecki, J. "Securité des Structures Sous L'action du Vent", Annales de L'ITBTP, série EM/201 N° 434, (Mai, 1985).
22. Wianecki, J. et Chevallier, A. "Aerodynamique Effects du Vent", CEBTP, N° 475, (Juin-Juillet, 1989).

# Relación de Personal Titulado de INTEMAC

## Arquitectos

Jalvo García, Jaime  
Luzón Cánovas, José M<sup>a</sup>

## Ingenieros de Caminos

Acón Robleda, Miguel Angel  
Calavera Ruiz, José  
Calderón Apolo, Juan Carlos  
Cortés Bretón, Juan María  
Corral Folgado, Claudio  
Cuesta Martín, José Ignacio  
Díaz Lozano, Justo  
Fernández Gómez, Jaime Antonio  
González González, Juan José  
González Valle, Enrique  
Hostalet Alba, Francisco  
Izquierdo Bernaldo de Quirós, José M<sup>a</sup>  
Jordán de Urrés de la Riva, Jorge  
Ley Urzaiz, Jorge  
Penón Molins, Eduardo  
Rodríguez Escribano, Raul Rubén  
Sanz Pérez, Lorenzo  
Sirvent Sirvent, Enrique  
Tapia Menéndez, José  
Torre Cobo, María Carmen  
Vilardell Carbonell, Jordi

## Ingeniero I.C.A.I.

Marín Estévez, Gonzalo

## Ingenieros Industriales

Alvarez Cabal, Ramón Amado  
Arroyo Arroyo, José Ramón  
Bueno Bueno, Jorge  
Durán Boldova, José Miguel  
Santos Olalla, Francisco  
Valenciano Carles, Federico

## Ingeniero de Telecomunicación

San José Arribas, José

## Licenciados en Ciencias Geológicas

Blanco Zorroza, Alberto  
Massana Milá, Joan

## Licenciados en Ciencias Químicas

Grandes Velasco, Sylvia María  
López Sánchez, Pedro  
Morgado Sánchez, José Carlos

## Licenciada en Geografía e Historia

Calavera Vayá, Ana María

## Arquitectos Técnicos

Custodio Sánchez, José M<sup>a</sup>  
Díez García, Francisco Javier  
Fuente Rivera, Jesús de la  
Miranda Valdés, Javier  
Montejano Jiménez, María del Carmen  
Muñoz Mesto, Angel  
París Sánchez, Eva María  
Riera Climent, María del Mar

## Ingenieros Técnicos Industriales

Díaz-Trechuelo Laffón, Antonio  
González Carmona, Manuel  
Madueño Moraño, Antonio  
Sánchez Orgaz, Miguel Angel

## Ingenieros Técnicos Obras Públicas

Aranda Cabezas, Lluís  
Carrero Crespo, Rafael  
Galán de Cáceres, M<sup>a</sup> del Puerto  
González Isabel, Germán  
González Nuño, Luis  
Mata Soriano, Juan Carlos  
Montiel Sánchez, Ernesto  
Muñoz Mesto, Angel  
Rosa Moreno, José Andrés  
Rozas Hernando, José Juan  
Sánchez Vicente, Andrés

## Ingenieros Técnicos Topógrafos

Carreras Ruiz, Francisco  
Molero Vicente, M<sup>a</sup> Isabel

## Profesores Mercantiles

González Alvarez, Vicente  
Sampedro Portas, Arturo

## Técnico en Administración de Empresas

González del Olmo, M<sup>a</sup> de la Peña de F.

## Técnico en Informática

García Rodríguez, Juan Tomás

## Técnico en Publicidad

Blanco Armas, Cristina

## Topógrafo

Alquézar Falceto, Ricardo

## CUADERNOS INTEMAC

CUADERNOS INTEMAC es una publicación trimestral, bilingüe en español e inglés, en forma de monografías que recogen trabajos realizados por los técnicos del Instituto o presentados en los Cursos y Conferencias organizados por el mismo.

Los temas tratados cubren tanto el campo de las Obras Públicas como el de la Edificación y sus Instalaciones.

• Tarifa de suscripción anual ..... 2.800 ptas.



### ULTIMOS TITULOS PUBLICADOS

**Cuaderno Nº 27**  
 "Comprobaciones finales de funcionamiento de instalaciones en la edificación".  
 Autores: **Gonzalo MARÍN ESTÉVEZ**,  
 Ingeniero I.C.A.I.  
**Prof. Federico VALENCIANO CARLES**,  
 Ingeniero Industrial.

**Cuaderno Nº 28**  
 "Análisis de la acción del viento en los edificios".  
 Autores: **José Ramón ARROYO ARROYO**,  
 Ing. Industrial.  
**Prof. Juan José BENITO MUÑOZ**,  
 Dr. Ing. Industrial.  
**Prof. Ramón ALVAREZ CABAL**,  
 Dr. Ing. Industrial.

### CUADERNOS DE PROXIMA APARICION

**Cuaderno Nº 29**  
 "Pavimentos de hormigón para usos especiales".  
 Autor: **Juan María CORTÉS BRETÓN**,  
 Dr. Ing. de Caminos.

**Cuaderno Nº 30**  
 "Investigación sobre la eficacia de los distintos sistemas de reparación de estructuras de hormigón dañadas por corrosión".  
 Autores: **Adolfo DELIBES LINERS**, (†)  
 Dr. Ing. de Caminos  
**Jaime FERNÁNDEZ GÓMEZ**,  
 Dr. Ing. de Caminos  
**Pedro LÓPEZ SÁNCHEZ**,  
 Ldo. en Ciencias Químicas

## VIDEOS TECNICOS

INTEMAC, dentro de sus actividades en el campo de la formación, ha iniciado la edición de una serie de VIDEOS TECNICOS, analizando distintos campos de la construcción.



### SERIE OBRAS DE HORMIGON EN MASA, ARMADO Y PRETENSADO.

REFERENCIA	TITULO	CONTENIDO	DURACION	PRECIO
Nº 8801 (1)	FABRICACION Y ENSAYO DE PROBETAS DE HORMIGON	Contempla, de forma completa y detallada, el proceso de toma de muestras de hormigón fresco en obra, medida de consistencia con el cono de Abrams, fabricación de probetas, curado en obra, transporte al laboratorio, curado en cámara, refrentado y ensayo a compresión.	27 min.	80.000 ptas* IVA INCLUIDO

### EN PREPARACION

REFERENCIA	TITULO	REFERENCIA	TITULO
Nº 8802 (2)	MUESTREO Y ENSAYO DE ARMADURAS DE HORMIGON ARMADO Y PRETENSADO	Nº 9002 (6)	EJECUCION DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON (II)
Nº 8901 (3)	PIEZAS DE HORMIGON ARMADO SOMETIDAS A FLEXION SIMPLE...	Nº 9101 (7)	PIEZAS DE HORMIGON ARMADO SOMETIDAS A ESFUERZO CORTANTE
Nº 8902 (4)	PIEZAS DE HORMIGON ARMADO SOMETIDAS A COMPRESION	Nº 9102 (8)	PIEZAS DE HORMIGON PRETENSADO SOMETIDAS A FLEXION SIMPLE
Nº 9001 (5)	EJECUCION DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON (I)		

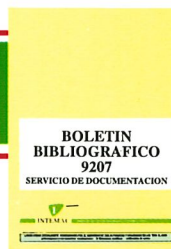
\* PRECIO para entregas dentro del territorio español

## BOLETIN BIBLIOGRAFICO

INTEMAC viene realizando desde su fundación un BOLETIN BIBLIOGRAFICO para uso interno, que ofrece, en una lectura rápida, un panorama general de todas las publicaciones técnicas disponibles. Desde 1991, esta publicación bimestral, ha sido puesta a disposición del público.

El BOLETIN BIBLIOGRAFICO incluye:

- Fotocopia del índice y de los resúmenes de los artículos contenidos en las 105 revistas técnicas que se reciben en el Instituto referentes a los campos de la Edificación, Instalaciones, Obras Públicas y Urbanismo.
  - Una sección de Normativa reciente, nacional y extranjera.
  - Secciones de Bibliografía y Cursos.
  - Una sección de Congresos, Reuniones Técnicas y Ferias de próxima celebración en todo el mundo.
- Tarifa de suscripción anual (6 números) . . . . . 18.000 ptas.



## CONSULTAS E INFORMES BIBLIOGRAFICOS

EL INSTITUTO tiene un SERVICIO DE DOCUMENTACION, que pone a su disposición y que le puede informar sobre cualquier tema relacionado con la Edificación, Instalaciones, Obra Civil y Urbanismo. Se efectúan CONSULTAS BIBLIOGRAFICAS sobre cualquiera de los temas indicados anteriormente, de acuerdo con las siguientes tarifas:

Apertura de expediente . . . . .	2.000 ptas.
Cantidad a abonar por referencia . . . . .	.60 ptas.
Cantidad a abonar por hoja de fotocopia de documento . . . . .	.25 ptas

Además de la Consulta Bibliográfica correspondiente, el INFORME BIBLIOGRAFICO contiene un breve documento redactado por un especialista en el tema, miembro de INTEMAC, con una serie de recomendaciones sobre la Bibliografía básica, así como los comentarios correspondientes.

Tarifa correspondiente al Informe Bibliográfico: 15.000 ptas. más la tarifa de la consulta.

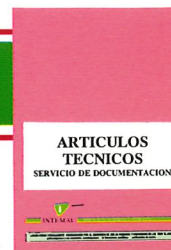


## ARTICULOS TECNICOS

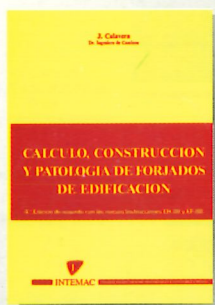
INTEMAC dispone de una amplia serie de trabajos publicados por nuestros técnicos en diferentes revistas. A continuación incluimos la lista de los últimos. Si está Vd. interesado, solicite relación completa de títulos.

- INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD Y LA CUANTÍA DE COSIDO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS PIEZAS COMPUESTAS SOLICITADAS A FLEXIÓN  
 Enrique González Valle; Jaime Gálvez Ruiz; Luis García Dutari; Ramón Álvarez Caval.
- EL HORMIGON DE ALTA RESISTENCIA (HSC): LAS CARACTERÍSTICAS QUE CONDICIONAN EL CALCULO ESTRUCTURAL. Enrique González Valle.
- LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE INFORMACIÓN EN LAS OBRAS. Adolfo Delibes Liniers.
- INVESTIGACIÓN SOBRE REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO DAÑADAS POR CORROSION DE ARMADURAS. Adolfo Delibes Liniers; Jaime Fernández Gómez.
- HORMIGONADO EN CONDICIONES METEOROLÓGICAS ADVERSAS: ESTUDIO DE LOS ACCIDENTES OCURRIDOS DURANTE EL HORMIGONADO DE UN TABLERO POSTENSADO.  
 Adolfo Delibes Liniers; Jaime Fernández Gómez; Miguel Ángel Acón Robleña.
- LA INFLUENCIA DEL DIAGRAMA TENSIÓN DEFORMACIÓN EN EL CÁLCULO A FLEXIÓN DE SECCIONES REALIZADAS CON HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA.  
 Enrique González Valle; José Mº Izquierdo; Bernaldo de Quirós.
- EFFECTOS DINÁMICOS EN PUENTES. VARIACION DEL COEFICIENTE DE IMPACTO.  
 Enrique López del Hierro Fernández; Juan José Benito Muñoz; Javier Gallego Valarde; Ramón Álvarez Cabal.
- CUBIERTAS METÁLICAS DE GRAN LUZ. Mercedes Gómez Álvarez; Justo Díaz Lozano; Ramón Álvarez Cabal.
- LA INSPECCIÓN Y ENSAYO. ORGANIZACIONES DE CONTROL DE CALIDAD Y LABORATORIOS.  
 José Calavera Ruiz.

P.V.P. 400 ptas./ ejemplar.



AGOTADO



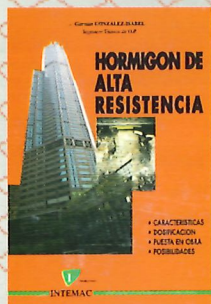
## CÁLCULO, CONSTRUCCIÓN Y PATOLOGÍA DE FORJADOS DE EDIFICACIÓN

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

**4ª Edición** (1988)

- 678 páginas
- Encuadernación en gualflex

**Precio: 7.900 Pta.**



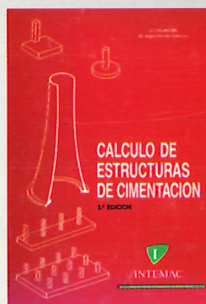
## HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA (1993)

G. GONZÁLEZ-ISABEL (Ingeniero Técnico de O. P.)

- 316 páginas
- Encuadernación en gualflex

**Precio: 6.500 Pta.**

AGOTADO



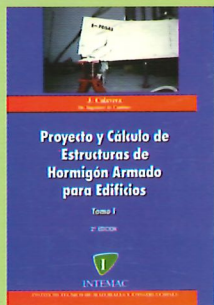
## CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE CIMENTACIÓN

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

**3ª Edición** (1991)

- 418 páginas

**Precio: 8.000 Pta.**

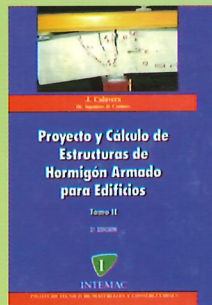


## PROYECTO Y CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO PARA EDIFICIOS (TOMO I)

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

**2ª Edición** (1991)

- Tomo I - Cálculo de esfuerzos
- 568 páginas
- Encuadernación en gualflex



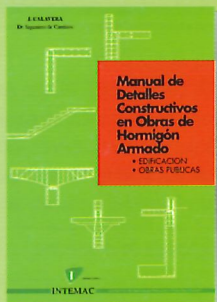
## PROYECTO Y CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO PARA EDIFICIOS (TOMO II)

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

**2ª Edición** (1991)

- Tomo II - Dimensionamiento y detalles constructivos
- 871 páginas
- Encuadernación en gualflex

**Precio obra completa: 17.500 Pta.**



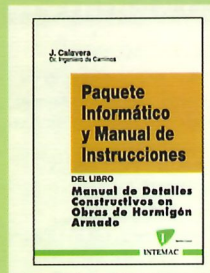
## MANUAL DE DETALLES CONSTRUCTIVOS EN OBRAS DE HORMIGÓN ARMADO (1993)

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

- 506 páginas, tamaño UNE A-4 • 210 detalles constructivos • 210 páginas de comentarios y recomendaciones • Encuadernación en gualflex

**Precio: - Libro: 16.000 Pta. - Paquete informático: 30.000 Pta. (Manual de Instrucciones y Disquetes)**

El libro y el programa se venden por separado



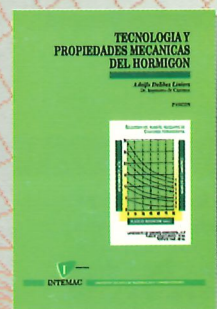
## MUROS DE CONTENCIÓN Y MUROS DE SÓTANO

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

**2ª Edición** (1989)

- 307 páginas
- Encuadernación en gualflex

**Precio: 7.000 Pta.**



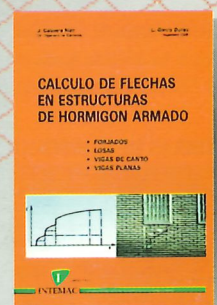
## TECNOLOGÍA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

A. DELIBES (Dr. Ingeniero de Caminos)

**2ª Edición** (1993)

- 396 páginas
- Encuadernación en gualflex

**Precio: 7.500 Pta.**



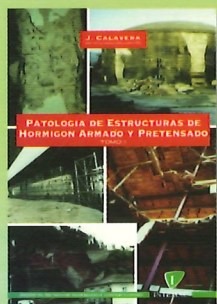
## CÁLCULO DE FLECHAS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO (1992)

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

L. GARCÍA DUTARI (Ingeniero Civil)

- 336 páginas
- 312 tablas de comprobación de Forjados, Losas, Vigas de Canto y Vigas Planas
- Un disquete conteniendo tres programas informáticos de Cálculo de Flechas, para secciones de forma cualquiera
- Encuadernación en gualflex

**Precio: 7.400 Pta. (Libro más paquete Informático)**



## PATOLOGÍA DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO Y PRETENSADO (1995)

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

- Tomo I - Capítulos 1 a 12 • Tomo II - Atlas de fisuras - Ábacos de cálculo
- 680 páginas • 231 fotografías • 258 figuras • 118 referencias bibliográficas
- Encuadernación en gualflex

**Precio de la obra completa: 16.000 Pta.**

