

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**Facultad de Ingeniería**

*REVISION DE CRITERIOS PARA ESTIMAR LA ACCION TURBULENTA DEL VIENTO  
EN ESTRUCTURAS*

**TRABAJO**

Presentado a la División de Estudios de posgrado de la

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DE LA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

*Por: Juventino Carlos Reyes Salinas*

como requisito para obtener

el grado de

**MAESTRO EN INGENIERIA**

**(ESTRUCTURAS)**

México D. F., Ciudad Universitaria, Enero de 1992.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DEPFI



DEPFI

T. UNAM

1 9 9 2

REY

## INTRODUCCION

El viento es un fenómeno que desde siempre ha causado estragos a la humanidad, tanto de pérdida de vidas como de contrucciones en general. Es por ello que su estudio es cada vez más importante.

Desde el punto de vista ingenieril, el análisis de sus efectos es complejo, por tratarse de un fenómeno aleatorio que para su descripción requiere de conocimientos estadísticos complejos, lo que dificulta el entendimiento del fenómeno.

Uno de los efectos con mayor importancia es la acción dinámica que el viento ejerce sobre las estructuras, su descripción y procedimientos para evaluarlo son el contenido del trabajo que a continuación se expone y que es enfocado primordialmente a la aplicación en edificios.

## CONTENIDO :

- 1) Características de la interacción viento-estructura.
  - 2) Valor medio de la acción en magnitud y dirección.
  - 3) Variabilidad de la acción por efectos turbulentos.
  - 4) Métodos para estimar el valor medio de la respuesta estructural.
  - 5) Procedimientos comunes para estimar la acción turbulenta del viento.
  - 6) Efecto del cambio de dirección por acción turbulenta.
  - 7) Estudio comparativo de procedimientos para valorar la acción turbulenta en edificios.
  - 8) Procedimiento de cálculo propuesto.
  - 9) Comentarios finales.
  - 10) Referencias.
- A) Apéndice A: método alternativo para el cálculo de fuerzas transversales a la acción del viento debidas a vórices alternantes.

## 1.- CARACTERISTICAS DE LA INTERACCION VIENTO-ESTRUCTURA.

### 1.1 GENERALIDADES.

Las condiciones atmosféricas, la topografía que rodea a la estructura, y las características geométricas y dinámicas de la estructura deben ser estudiadas para el análisis del movimiento que la interacción viento-estructura produce en una estructura dada.

Para una buena estimación de la acción del viento es necesario conocer:

- a) El estado de estabilidad de la atmósfera, para una correcta selección de la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el terreno.
- b) Condiciones topográficas que rodean al edificio, para definir el coeficiente de rugosidad.
- c) Espectros de turbulencia en diferentes alturas.
- d) La matriz de correlación de la distribución espacial de la turbulencia del viento.
- e) Registros estadísticos de las velocidades del viento.
- f) Características del edificio, relacionadas con la distribución de masa, matriz de rigidez, valores de amortiguamiento y áreas expuestas.

Con base en la información anterior es posible identificar cuatro tipos básicos de efectos de la interacción inducidos por la acción del viento, éstos son:

- 1) Flujo laminar.
- 2) Generación de vórtices.

3) Turbulencia del aire.

4) Separación de la capa límite que rodea a los cuerpos.

En puntos siguientes de este tema se describen características de los efectos básicos 1), 2) y 4); respecto al número 3), se hablará ampliamente durante este trabajo.

Al conocer los ya mencionados efectos básicos de la interacción viento-estructura, se puede describir esquemáticamente los movimientos generados por la acción básica del viento en las estructuras, así como los tipos de ellas sensitivas a tal acción. La fig. (1.1.1) muestra tal descripción (ref.4).

ACCION DEL VIENTO

MOVIMIENTO PRODU-  
CIDO

ESTRUCTURAS  
QUE PUEDEN SER  
ANALIZADAS

EMPUJE EN FLUJO  
LAMINAR

DESPLAZAMIENTO  
EN DIRECCION DE Y

EN TODO TIPO DE  
ESTRUCTURAS

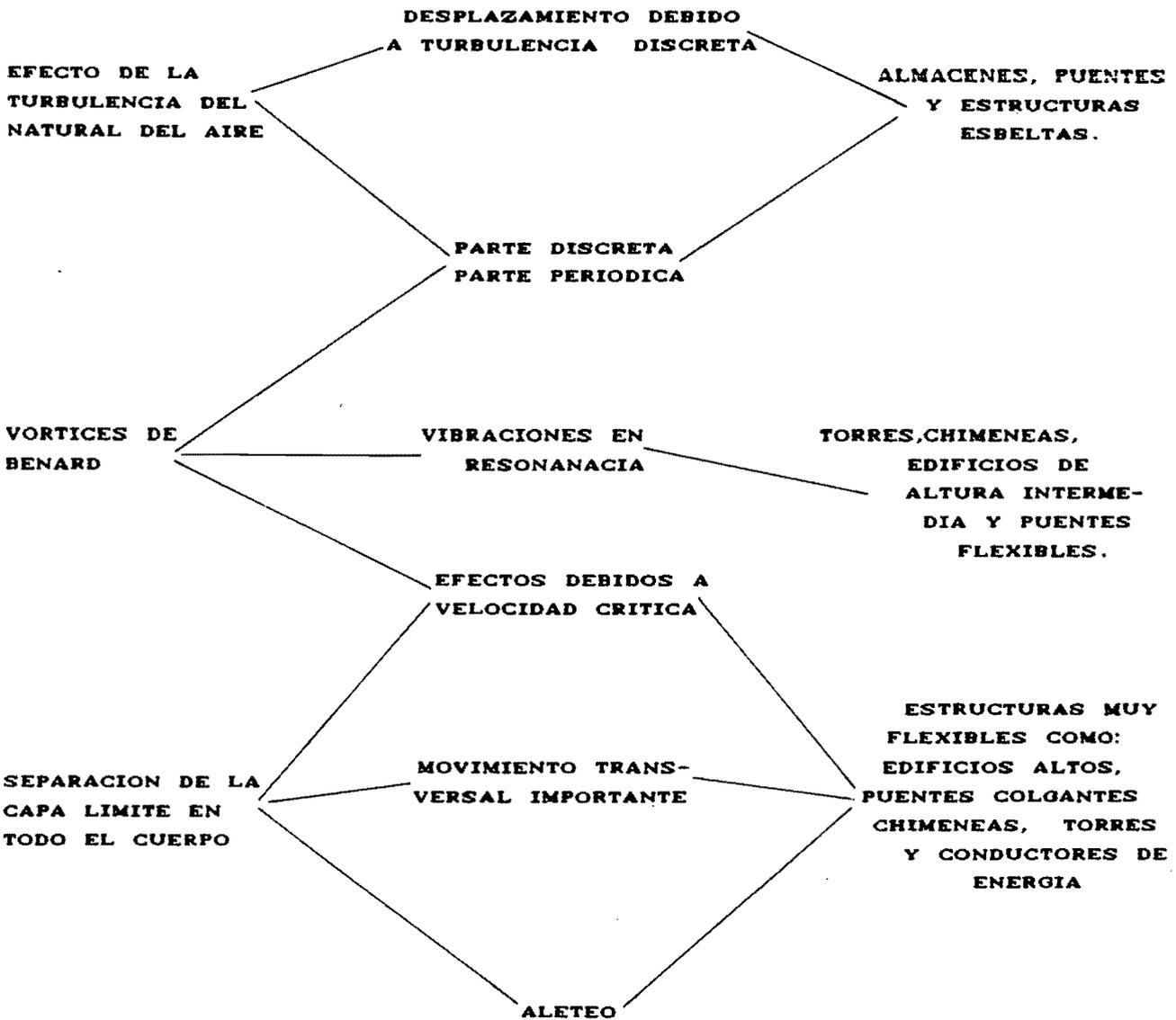


FIG. 1.1.1.

## 1.2 ANALISIS DE LA INTERACCION FLUJO LAMINAR-ESTRUCTURAS RIGIDAS.

Se sabe que las estructuras rígidas con bajos periodos naturales de vibración no son sensitivas a los efectos turbulentos. Sin embargo cuando existe la necesidad de analizar la inestabilidad general y local de una estructura, se debe considerar además los efectos generados por flujo laminar.

Para el análisis de la estabilidad general, se considera que el viento produce fuerzas estables, las cuales pueden ser calculadas mediante la aplicación del principio de Bernoulli. Así es posible encontrar dos tipos de fuerzas localizadas en las caras de la estructura:

a) Fuerzas longitudinales

$$F_L = \frac{1}{2} \rho (V_d)^2 C_{DL} A_L \quad (1.2.1)$$

b) Fuerzas transversales

$$F_T = \frac{1}{2} \rho (V_d)^2 C_{DT} A_T \quad (1.2.2)$$

donde:

$F_L, F_T$       fuerzas debidas al viento, longitudinal y transversal  
                  respectivamente

$\rho$                 densidad del aire

$V_d$              velocidad del viento en la dirección de  
                  análisis longitudinal

$C_{DL}, C_{DT}$     coeficientes de arrastre longitudinal y transversal,  
                  obtenidos de mediciones en el túnel de viento

$A_L, A_T$         áreas de exposición en la dirección longitudinal y  
                  y transversal, respectivamente.

Estas fuerzas están localizadas en el centro de presión del área expuesta de la estructura, que en general no coincide con el centroide del área, lo que ocasiona un momento de volteo que debe ser considerado para el análisis de la estabilidad de la cimentación de la estructura donde el viento actúa, para evitar

movimientos laterales o verticales en dicha estructura.

Los coeficientes de arrastre  $C_{DL}$  y  $C_{DT}$  son altamente dependientes del número de Reynolds,  $Re$ . Para el análisis del flujo laminar, es común el uso de valores obtenidos de mediciones dentro del intervalo  $10^4 \leq Re \leq 10^5$ , en el cual el coeficiente de arrastre es bastante estable. Los valores de  $C_D$  son dados en códigos de construcción y literatura técnica, para estructuras de diferentes dimensiones y formas. Sus valores son definidos por integración de las presiones encontradas en las superficies de los cuerpos.

La distribución de presión alrededor de un cuerpo es descrita por:

$$P = \frac{1}{2} \rho V_D^2 C_P \quad (1.2.3)$$

donde:

$P$  presión en un punto cualquiera de la superficie

$\rho$  densidad del aire

$V_D$  velocidad de diseño del viento, tomada bajo flujo libre

$C_P$  coeficiente de presión en un punto cualquiera

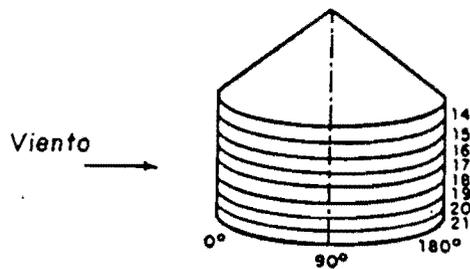
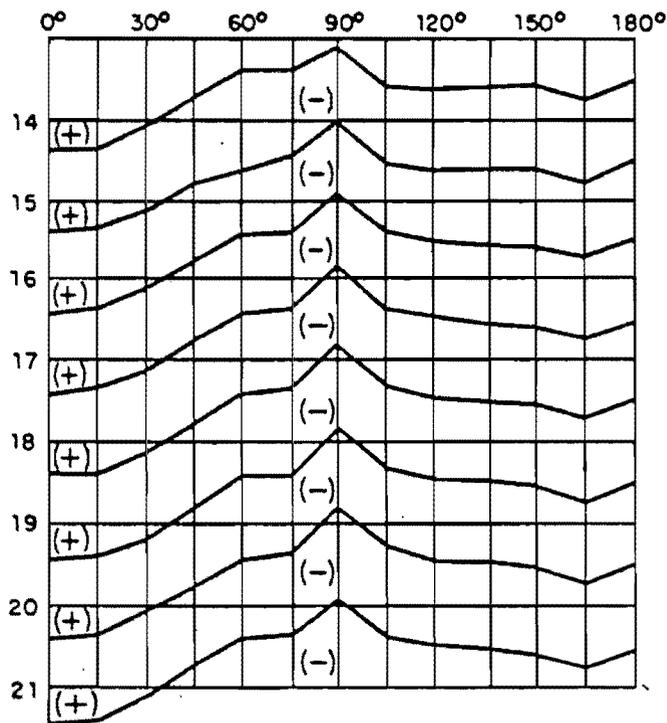
Los coeficientes de presión son obtenidos de modelos de prueba en túneles de viento bajo flujo laminar; en ellos se muestran dibujos de las líneas isobáricas marcadas en la superficie del modelo, donde se mide la presión inducida por el viento.

Frecuentemente, para el análisis de cubiertas de chimeneas, silos o torres en estaciones de energía, es útil expresar los valores de  $C_P$  como series de Fourier, lo cual permite un análisis matemático simple del equilibrio de la cubierta bajo la acción del viento.

La fig. (1.2.1) muestra la distribución de presión alrededor de un silo metálico, causada por flujo laminar (ref. 3).

(+) Presión  
 (-) Succión

0 1 2 3 5  $\bar{c}_p$  Coeficiente de presión.



**Fig. I.2.1 Coeficientes de presión bajo flujo laminar en un silo metálico.**

Es también importante el conocimiento de la distribución de la presión interna generada en estructuras, para lo que es necesario hacer un análisis en orden proporcional con los efectos locales producidos por la acción del viento, en las partes de la estructura que se vean afectadas por tal acción.

En los códigos de construcción usualmente se toman en cuenta los efectos locales creados por el viento en edificios rectangulares, tejados, parapetos, tapas de chimeneas, tragaluces, techos de lámina, con un incremento de los valores de  $C_p$  en áreas específicas y en el mismo orden se dan incrementos para que las uniones sean capaces de soportar las fuerzas de viento.

Una vez conocida la distribución de presión, se puede llevar a cabo el análisis estructural para conocer: los desplazamientos generados por la acción del viento, fuerzas internas, posibles momentos que se generen, y reglas de diseño que puedan ser aplicadas para definir adecuadamente las dimensiones de la estructura.

### 1.3 EFECTOS DEBIDOS A LA FORMACION DE VORTICES.

La evidencia física muestra que los vórtices periódicos se generan debido a la separación de la capa límite que rodea a los cuerpos y que además su formación trae como resultado efectos transversales a la acción del viento.

Para explicar tal evidencia física se ha tomado como experimento un cilindro circular liso, sujeto a la acción del viento, encontrando vórtices de diferente tipo, que dependen del número de Reynolds,  $Re$ . Así en la literatura se han encontrado descritos tres intervalos de formación de vortices:

a) Intervalo subcrítico, con formación periódica del vórtice, cuando:

$$Re < 3 \times 10^5$$

b) Intervalo crítico con formación al azar del vórtice, cuando:

$$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$$

c) Intervalo ultracrítico, con formación periódica del vórtice, para:

$$Re > 3.5 \times 10^6$$

En intervalos donde aparece la formación periódica del vórtice, pares de ellos de igual fuerza pero de rotación inversa, se forman alternativamente en lados opuestos del cilindro.

Como resultado, se generan oscilaciones en dirección perpendicular a la acción del viento, producidas por cambios periódicos en la distribución de presión alrededor del perímetro.

En cuanto a la frecuencia de vibración de los vórtices y de la estructura se puede decir que:

- a) Cuando la frecuencia del vórtice coincide con la de la estructura, resulta una excitación armónica, en resonancia.
- b) Si la frecuencia del vórtice es un múltiplo de la frecuencia natural de la estructura, el resultado es una excitación subarmónica.

De acuerdo al orden de frecuencia del vórtice, se puede definir el número de Strohual como:

$$S = n B/V \quad (1.3.1)$$

donde:

- S número de Strohual, adimensional
- n frecuencia del vórtice, en Hertz
- B dimensión transversal a la dirección del viento, en m.
- V velocidad media del viento, en m/seg.

Cuando el número de Reynolds es menor a  $3.5 \times 10^5$ , y debido a que la forma de los cuerpos bajo la acción del viento define un valor numérico particular del número de Strohual, es posible establecer valores de dicho número para los cuales aparecen los vórtices periódicos. Algunos de estos valores para diferentes perfiles estructurales son mostrados en la fig.(1.3.1) (ref.3).

Cuando el número de Reynolds es aproximadamente  $3 \times 10^5$ , el número de Strohual se incrementa bruscamente, el coeficiente de arrastre muestra una pendiente brusca fig.(1.3.2) (ref.3), y la excitación disminuye.

Del mismo modo existe una manera para el cálculo de la respuesta armónica. Así para un modelo de un grado de libertad sin excitación externa, la ecuación que describe su movimiento es:

$$m \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + k x(t) = 0 \quad (1.3.2)$$

donde:

$x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$  son desplazamientos a partir de la posición de equilibrio, velocidad y aceleración respectivamente

C coeficiente de amortiguamiento viscoso, en kg-seg/m.

k constante del resorte equivalente, en kg/m.

m masa de la estructura, en kg-seg<sup>2</sup>/m.

Cuando:

$C < 2 \sqrt{m k}$ , es posible definir:

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (1.3.3)$$

$$\beta_0 = C / (2 \sqrt{m k}) \quad (1.3.4)$$

donde:

$\omega_0$  frecuencia angular natural no amortiguada de la estructura, en seg.<sup>-1</sup>

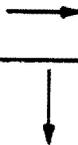
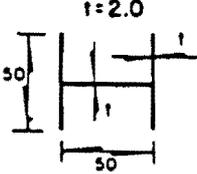
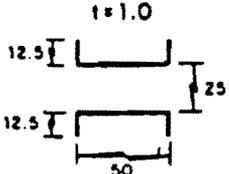
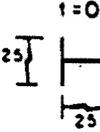
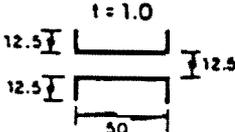
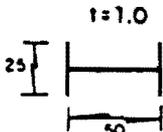
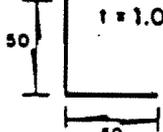
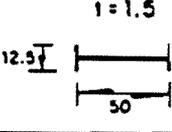
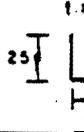
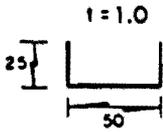
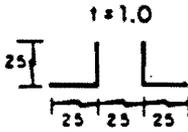
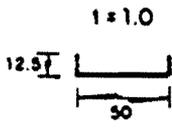
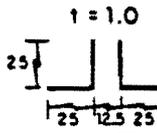
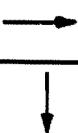
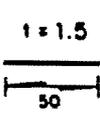
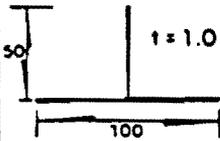
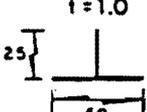
Viento	Dimensiones del perfil en mm	Valor de S	Viento	Dimensiones del perfil en mm.	Valor de S
		0.120			0.147
		0.137			
		0.120			0.150
		0.144			0.145
					0.142
					0.147
		0.145			0.131
					0.134
					0.137
		0.140			0.121
		0.153			0.143
		0.145			0.135
		0.168			
		0.156			0.160
		0.145			
11800 < Re < 19100  Cilindro.		0.200			0.114
					0.145

Fig. I.3.1 Número de Strouhal para algunos perfiles

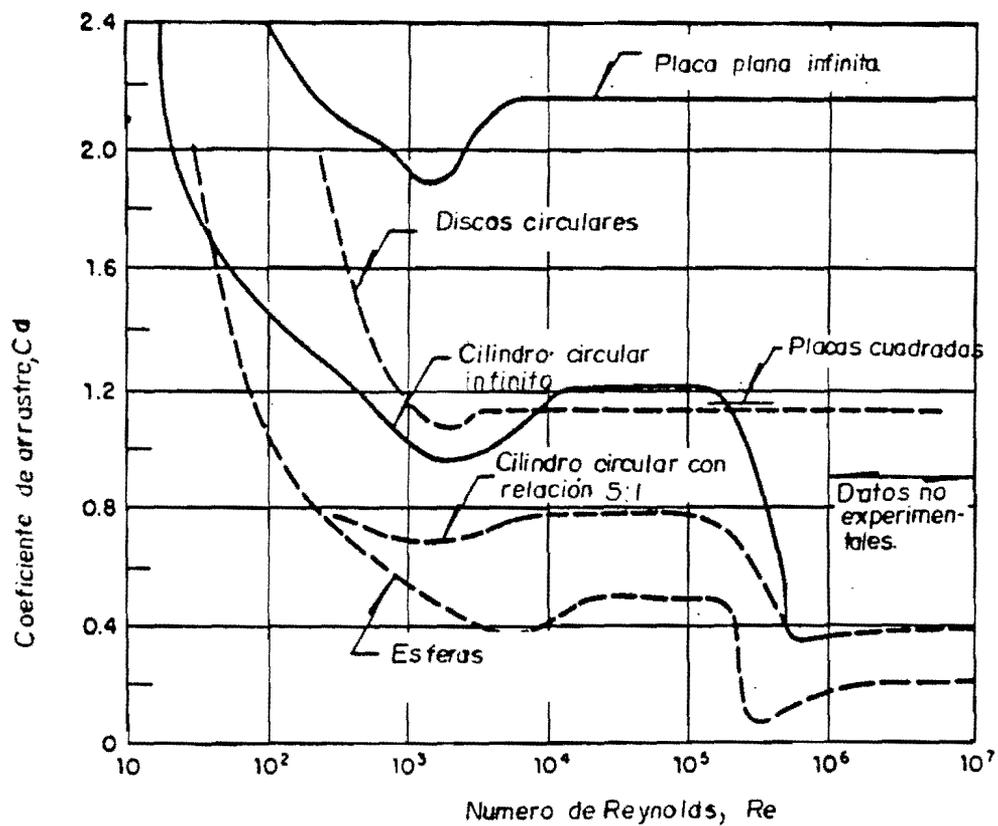


Fig. 1.3.2 Variacion de  $C_d$  con  $Re$ .

$\beta_0$  razón de amortiguamiento entre C y el valor crítico:

$$C_{cr} = 2 \sqrt{m k}$$

La excitación por vórtices induce una fuerza de excitación aerodinámica  $F(t)$  cuyo valor por unidad de longitud,  $\text{kg/m}$ , de acuerdo al movimiento armónico simple, con semi-amplitud, en  $\text{m}$ ,  $X_0$  y frecuencia  $\omega$ , en  $\text{seg}^{-1}$ , puede ser expresada por:

$$F(t) = (A \sin(\omega t) + D \cos(\omega t)) \eta_0 \rho V^2 B \quad (1.3.5)$$

donde:

$t$  tiempo, en  $\text{seg}$ .

$$\eta_0 = X_0/B$$

$B$  dimensión transversal al viento, en  $\text{m}$ .

$\rho$  densidad del aire, en  $\text{kg/m}^3$ .

$A, D$  constantes

La ecuación (1.3.5) puede ser escrita también como:

$$F(t) = H_a x(t) + K_a x(t) \quad (1.3.6)$$

Al introducir estas fuerzas en la ecuación de movimiento que gobierna las oscilaciones transversales a la dirección del viento, se tiene:

$$m\ddot{x}(t) + (C - K_a)x(t) + (k - H_a)x(t) = 0 \quad (1.3.7)$$

En las que  $K_a$  expresa la contribución al amortiguamiento total del sistema, en la excitación aerodinámica. Usando decremento logarítmico en la oscilación,  $\delta$ , definida como la razón de amplitudes entre dos ciclos consecutivos, es decir,  $\delta = 2\pi\beta_0$ ,  $K_a$ , en  $\text{kg-seg/m}$ , puede ser expresada como:

$$K_a = 2m n \delta \quad (1.3.8)$$

donde:

$m$  masa equivalente por unidad de longitud de la estructura, en  $\text{kg-seg}^2/\text{m}$ .

n frecuencia de oscilación, de la excitación en Hertz

$H_a$ , en kg/m., expresa el efecto de la excitación aerodinámica en la frecuencia natural de la estructura,  $n_0$ ; ésta es definida por:

$$H_a = 4\pi^2 m n^2 \left[ 1 - \frac{n_0^2}{n^2} \right] \quad (1.3.9)$$

donde:

$n_0$  frecuencia natural de la estructura, en Hertz

Cuando se trate de vibraciones estables generadas en una estructura flexible, la fuerza aerodinámica, en kg., puede ser escrita de la manera siguiente:

$$F(t) = 4\pi n^2 B m \delta n_0 \rho \cos(2\pi n t) \quad (1.3.10)$$

y el desplazamiento, en m., como:

$$X = X_0 \sin(\omega t) \quad (1.3.11)$$

donde:

$\omega$  frecuencia angular de la excitación en  $\text{seg.}^{-1}$

Los valores de las fuerzas y desplazamientos pueden ser reducidos usando tres recursos diferentes:

- a) Modificación de la estructura, cuando su frecuencia natural es similar a la obtenida del número de Strohual, mediante el uso de contraventeos.
- b) Incrementando el amortiguamiento efectivo, a través de la instalación de amortiguamiento mecánico para reducir la amplitud de las vibraciones.
- c) En cilindros circulares usando anillos de refuerzo o bien refuerzo helicoidal que rodee al miembro, para evitar la excitación por vórtices.

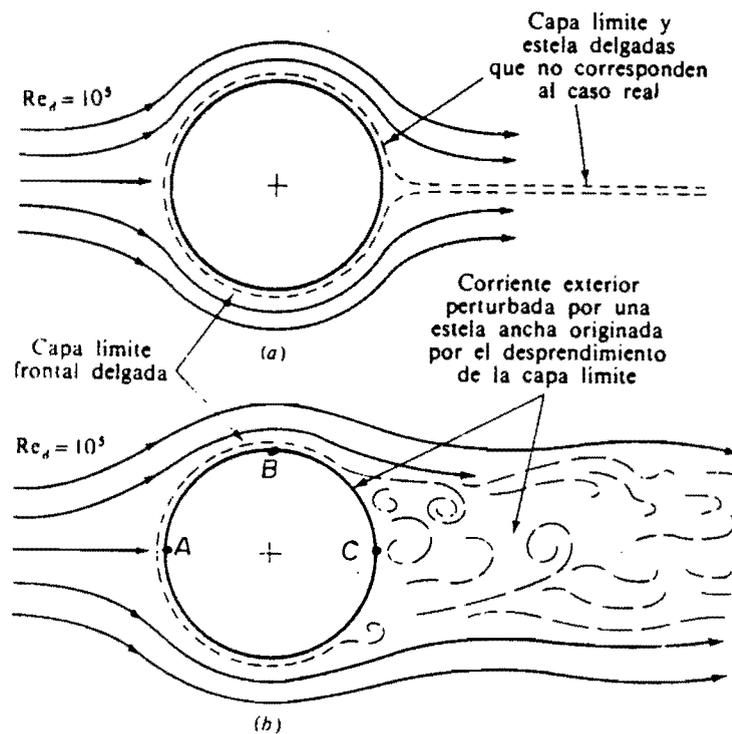
#### 1.4 SEPARACION DE LA CAPA LIMITE.

El concepto de capa límite es debido originalmente a Prandtl, siendo este concepto íntimamente relacionado con el estudio del flujo del viento.

En el desarrollo de la teoría de capa límite existen contradicciones entre el comportamiento real y teórico del fenómeno, tales como las existentes entre la distribución de presiones medida experimentalmente y la distribución teórica; estas discrepancias crecen cuando el número de Reynolds es pequeño. También hay diferencias que dependen de la rugosidad y forma del cuerpo. Para ilustrar el fenómeno basta ver la fig. (1.4.1) que muestra el caso particular de un cilindro circular liso (ref.11).

Aún con las contradicciones antes mencionadas es posible explicar el fenómeno de la separación de la capa límite y formación de vórtices. Tomemos el caso particular ya mencionado, de flujo alrededor de un cilindro circular liso, para explicar el fenómeno antes citado.

Con base en la fig.(1.4.1b) para flujo de viento ideal, las velocidades se incrementan a lo largo de la trayectoria entre los puntos A y B, en consecuencia, de acuerdo a la ecuación de Bernoulli, las presiones decrecen, mientras que a través de la trayectoria existente entre los puntos B y C las velocidades decrecen y las presiones se incrementan. Al considerar la energía cinética del flujo del viento en la capa límite, ésta se pierde por fricción con la superficie del cuerpo en el camino de A a B; como resultado, la energía cinética restante no es suficiente para mantener el flujo laminar adherido a la superficie y por tanto ocurre la separación de la capa límite, en un punto generalmente posterior a B, cuya posición depende del número de Reynolds, es decir, del tipo de flujo que se presente (laminar, transición o turbulento), así como de la rugosidad y la curvatura de la superficie expuesta.



**Fig. 1.4.1 Flujo real (b) y teórico (a),  
 en la capa límite.**

Los efectos que trae consigo la separación de la capa límite son:

- a) Produce grandes succiones en la cercanía del punto C, lo que produce fuerzas de arrastre adicionales en la dirección del flujo, y fuerzas en dirección perpendicular al flujo por aparición de circulación, en esa dirección.
- b) Debido a la existencia de un retroflujo entre los puntos A y B, ocurre la formación de vórtices como lo muestra la fig. (1.4.1b).

## 2. - VALOR MEDIO DE LA ACCION EN MAGNITUD Y DIRECCION

### 2.1 GENERALIDADES

Es interesante mencionar que el viento es parte de la circulación general de la atmósfera, y se puede definir como un movimiento producido por la acción de la gravedad en las masas de aire de diferentes densidades, por la desviación de las fuerzas debidas a la rotación de la tierra, por las fuerzas centrífugas debidas a la curvatura de la superficie por la cual viaja el viento, y por efectos termodinámicos.

Dentro de esta definición de viento están implícitas dos de sus características que son de suma importancia, su magnitud y su dirección. De las que a la ingeniería de viento para fines de diseño le interesa conocer el vector representativo en diversos instantes. En general la magnitud del viento se mide a través de su velocidad, por lo que en lo que sigue, al hablar de la magnitud de la acción del viento se hará referencia a su velocidad, en cuanto a la dirección, ésta se mide por un ángulo respecto a la dirección general del flujo.

### 2.2 VALOR MEDIO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO.

De acuerdo a estudios meteorológicos, los gradientes de presión y temperatura, los cambios en la densidad de masa del aire, los efectos de la velocidad angular de rotación de la tierra, la latitud del punto de observación, así como la viscosidad del aire; son factores que causan cambios en la velocidad del aire, esto crea la necesidad de definir para cada región un valor de la velocidad media del viento.

Para obtener el valor de la velocidad media regional, se recurre a información obtenida en los observatorios meteorológicos, en donde se registran las velocidades diarias.

Con la información meteorológica obtenida se debe

definir un periodo de retorno, el cual está en función de la vida útil de la construcción y que servirá para el cálculo de la velocidad media regional probable, la que se obtiene de una función de distribución teórica, que representa a la información contenida en registros meteorológicos. La función Fisher-Tippett tipo II genera resultados aceptables (ref.5), y su definición está expresada por:

$$F(V_i) = e^{-(V_i / \beta)^\gamma} \quad (2.2.1)$$

donde:

$F(V_i)$  es la función de distribución de velocidades y representa la probabilidad de que ocurra  $V_i$   
 $\beta, \gamma$  son parámetros estadísticos  
 $V_i$  nivel de velocidad del viento  
 (en este caso velocidad media regional)

Así, a través del conocimiento de los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$  en un sitio, es posible obtener la velocidad media regional probable como sigue:

- Al calcular leyes de logaritmos a la ecuación (2.2.1) se tiene:

$$\ln F(V_i) = -(V_i / \beta)^\gamma$$

$$|\ln F(V_i)| = (V_i / \beta)^\gamma$$

- al tomar la raíz gamésima:

$$\sqrt[\gamma]{|\ln F(V_i)|} = \beta / V_i$$

- finalmente:

$$V_i = \frac{\beta}{\sqrt[\gamma]{|\ln F(V_i)|}} \quad (2.2.2)$$

Pero también es posible expresar a  $F(V_i)$  en función del periodo de retorno,  $R$ , por tanto:

$$F(V_i) = 1 - \frac{1}{R} \quad (2.2.3)$$

al tomar logaritmos a la ecuación (2.2.3)

$$F(V_i) = \ln \frac{R-1}{R} \implies \ln F(V_i) = \ln(R-1) - \ln R \quad (2.2.4)$$

al sustituir la ecuación (2.2.4) en (2.2.2), se tiene la expresión que define a la velocidad media regional:

$$V_{iR} = \frac{\beta}{\gamma \sqrt{\ln(R-1) - \ln(R)}} \quad (2.2.5)$$

de acuerdo con esta expresión  $R$  y  $\gamma$  son adimensionales y  $\beta$  tiene unidades de velocidad.

Por consiguiente bastará conocer el valor de los parámetros  $\gamma$  y  $\beta$ , además del valor del periodo de retorno para conocer el valor de la velocidad media regional,  $V_{iR}$ , asociada al periodo de retorno propuesto.

Periodos de retorno recomendados por los códigos de construcción, en función del uso de la estructura son:

- a) Estructuras cuya falla no implicará la pérdida de vidas humanas, se puede tomar  $R = 5$  años.
- b) Para estructuras permanentes, excepto las que presentan un alto grado de sensibilidad al viento o un grado alto de peligro para la vida humana o propiedades, en caso de falla,  $R = 30$  años.
- c) Excepciones de b) y estructuras las cuales deban permanecer intactas después de un desastre,  $R = 100$  años.

De la ecuación de (2.2.5) se puede llegar a la expresión aproximada que sigue:

$$V_{i_R} = V_{i_{R'}} \sqrt{R / R'} \quad (2.2.6)$$

donde:

$V_{i_R}$	velocidad para un periodo de retorno dado
$V_{i_{R'}}$	velocidad para un periodo de retorno conocido
$R$	periodo de retorno dado
$R'$	periodo de retorno conocido

Una vez encontrada la velocidad media regional, ésta debe ser multiplicada por factores de corrección para obtener la velocidad media de diseño. Dichos factores dependen de la exposición de la estructura al viento y de las características topográficas que la rodeen.

La Fig. (2.2.1) da una evaluación de  $V_{i_R}$  para algunas ciudades de México (ref. 3).

Por desgracia la velocidad media no es constante con la altura, ya que existen factores como la fricción que se genera por el movimiento del aire sobre la superficie de la tierra, creando la llamada capa límite y con ella la formación de turbulencia, que trae como consecuencia la variación de la velocidad media con la altura. Por lo que para conocer la variación de la velocidad media con la altura, en la gran mayoría de los textos se recurre a la teoría estadística de mezclado de Prandtl (ref. 3), la cual establece que:

$$\bar{V}_z = \bar{V}_{10} (h/10)^\alpha \quad (2.2.7)$$

donde:

$\bar{V}_z$	velocidad media del viento (en m/seg) a una altura $Z$ sobre el nivel del terreno
$\bar{V}_{10}$	velocidad media del viento (en m/seg) a una altura de 10m. sobre el nivel del terreno
$h$	altura (en m.) donde se registra $\bar{V}_z$
$\alpha$	número adimensional

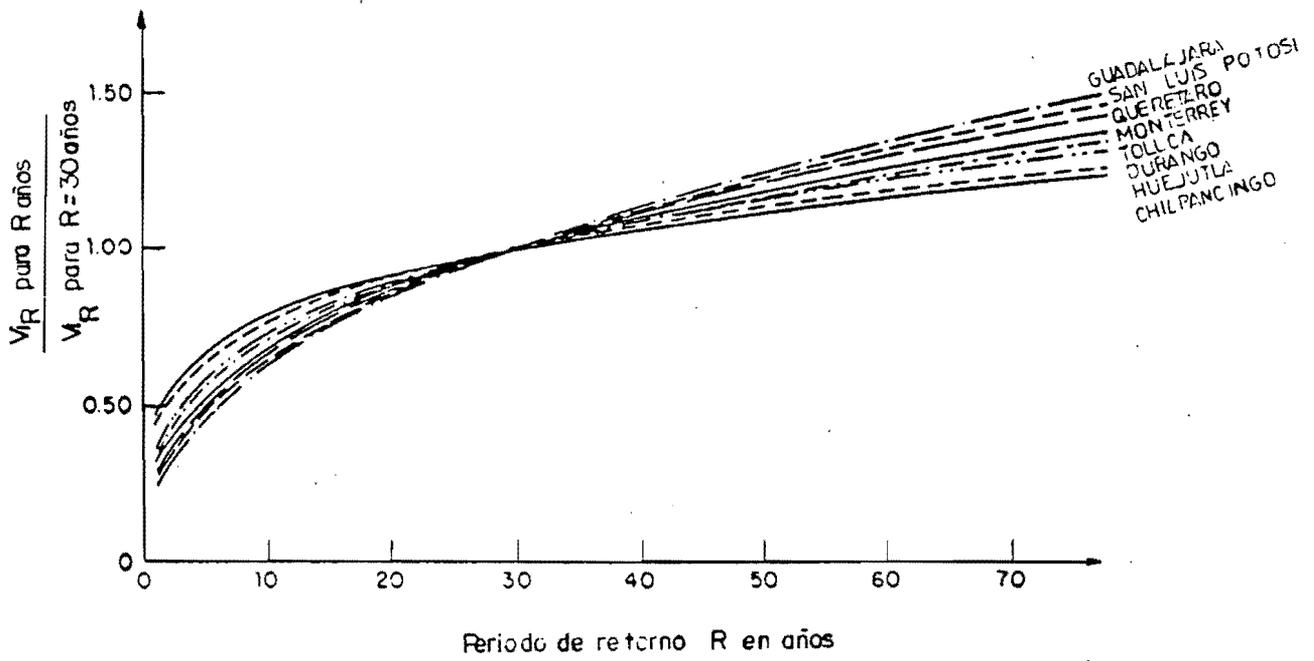


Fig 2.2.1  $V_{iR}$  para algunas ciudades de Mexico.

En la tabla (2.2.1), algunos valores comunes de  $\alpha$  son recomendados (ref.3). Estos valores dependen de las características topográficas del lugar de medición, así como del gradiente térmico vertical.

Otra alternativa para el cálculo de la variación de la velocidad media con la altura es la llamada teoría del balance de energía (ref.3), la que propone la siguiente expresión para  $\bar{V}_z$  :

$$\bar{V}_z = \frac{V^*}{K_*} \ln \left( \frac{h - Z_d}{Z_o} \right) \quad (2.2.8)$$

donde:

$K_*$	constante de Von Karman, igual a 0.4
$V^*$	velocidad de fricción = $\sqrt{\tau / \rho}$
$Z_d$	longitud desplazada
$Z_o$	longitud rugosa
$\tau$	esfuerzo cortante horizontal , $\text{kg/m}^2$
$\rho$	densidad del aire, $\text{kg} - \text{seg}^2 / \text{m}^4$

En la tabla (2.2.2) se dan algunos valores comunes en ingeniería, para los parámetros  $Z_d$  y  $Z_o$  (ref.3).

Finalmente en la fig.(2.2.2) se da una muestra de la variación de la velocidad con la altura (ref.3).

### 2.3 VALOR MEDIO DE DIRECCION DEL VIENTO.

De acuerdo a la literatura, la solución de las ecuaciones de movimiento de un fluido, bajo la influencia de la rotación de la tierra, predicen cambios en la dirección del viento, entre el nivel del terreno y el gradiente de altura  $Z_a$ , siendo éste la altura donde el flujo del viento, se mueve sin la influencia de la fricción existente entre el aire y el terreno.

Algunas teorías simples como la debida a Ekman, que predice un cambio medio de dirección de  $45^\circ$  entre el nivel del terreno y

TIPO DE TERRENO	VALORES DE $\alpha$
A) Campo abierto con pocos obstaculos como: campos de pastoreo o cultivo con pocos árboles.	0.16
B) Terreno abierto con obstáculos de 10 a 15m. de altura, como: zonas residenciales ó pequeños poblados.	0.28
C) Terreno con grandes irregularidades como: centro de grandes ciudades.	0.40

Tabla 2.2.1

TIPO DE TERRENO	Z <sub>0</sub> (metros)	Z <sub>d</sub>
A) Areas abiertas de agua o mares.	0.005 - 0.01	0
B) Terrenos sin obstáculos.	0.03 - 0.10	0
C) Alrededores de pequeños poblados.	0.20 - 0.30	0
D) Centro de poblados pequeños.	0.35 - 0.45	0
E) Centro de grandes ciudades. ( $\bar{H}$ , es el promedio de la altura de los edificios circundantes.)	0.60 - 0.80	20 m. ó 0.75 $\bar{H}$ .

Tabla 2.2.2

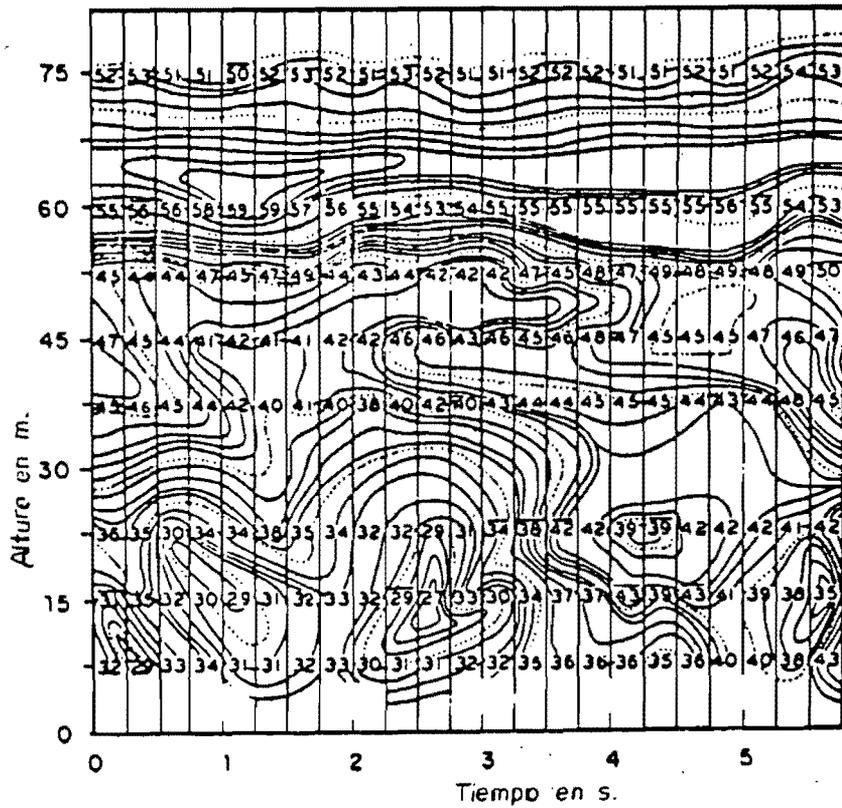


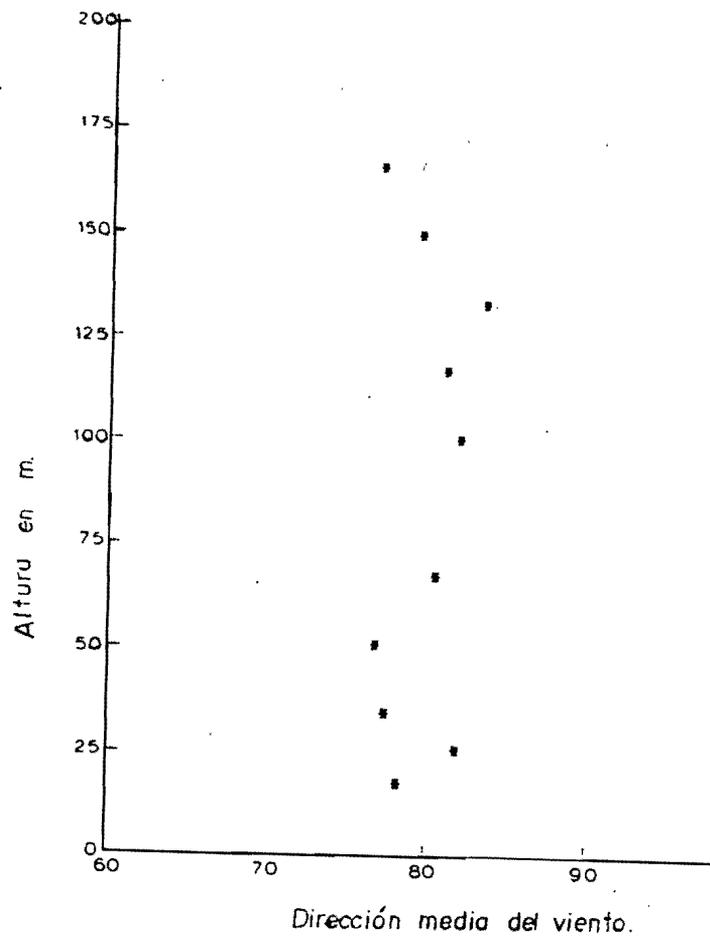
Fig. 2.2.2 Líneas de igual velocidad observadas por Sherlock

el gradiente de altura  $Z_0$ . Por esta razón el cambio medio de la dirección del viento con la altura es conocido frecuentemente como la Espiral de Ekman.

Otras Teorías más sofisticadas como las de Sutton y Kohler, las cuales toman en cuenta la rugosidad del terreno. La teoría de Sutton predice valores dentro del intervalo de  $31^\circ$  en áreas abiertas y  $45^\circ$  en centros de ciudades, al mismo tiempo la teoría de Kohler predice valores de  $12^\circ$  a  $30^\circ$ .

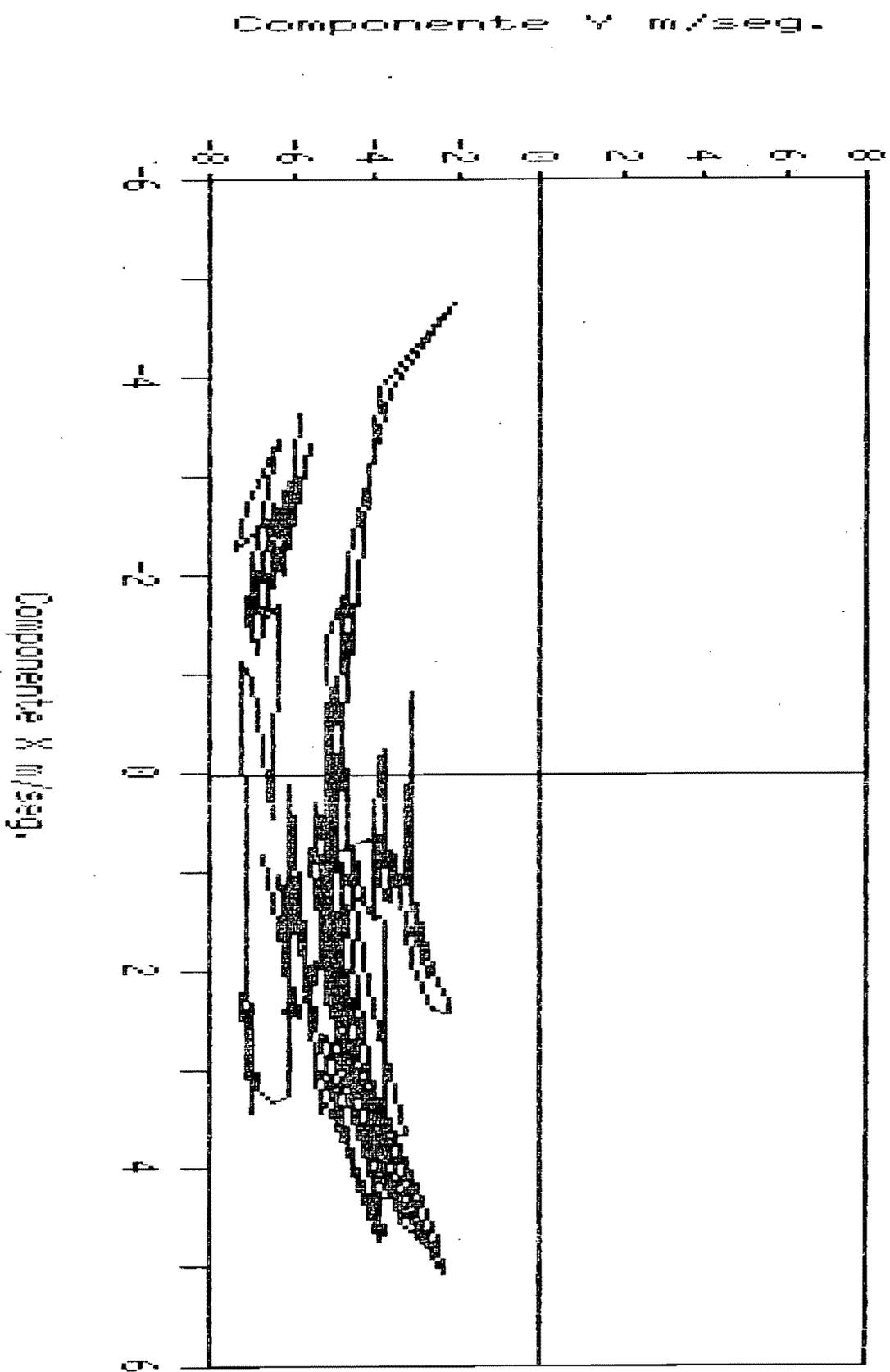
La Fig.(2.3.1) muestra valores medios de la dirección del viento medidos en la estación de radio Rugby G.P.O. (ref.9), localizada en Londres Inglaterra, hechas en condiciones estables, en la que se puede ver que hay cambios de la dirección con la altura sobre el nivel del terreno. Ello implica que para el diseño de construcciones muy altas, o muy sensitivas al cambio de la dirección del viento con la altura, tal efecto no debe ser ignorado.

Por otro lado en el cambio de la dirección del viento a una altura fija sobre el terreno, se ve claramente que la dirección del viento cambia casi instantáneamente, esto se confirma analizando la fig.(2.3.2) (ref.8), la cual muestra el movimiento de una partícula. Es por ello que los reglamentos actuales de viento, como el de Australia, han empezado a tomar en cuenta el efecto (ver sección 6).



**Fig. 2.3.1 Dirección media del viento medida en Rugby.**

Fig. (2.3.2) Gráfica de la velocidad a 3m de altura en una torre de medición.



### 3.- VARIABILIDAD DE LA ACCION POR EFECTOS TURBULENTOS.

A través del estudio de la turbulencia del viento, se ha observado una propiedad especial, relacionada con las variaciones de su velocidad, la cual presenta variaciones que ocurren en tres sentidos: longitudinal, vertical y transversal. Se sabe además, que la mayoría de las variaciones se presentan en sentido longitudinal.

Las características de esas variaciones dependen, en principio, de la cantidad de obstáculos existentes en el paso del flujo de aire.

La fig. (3.1) muestra la variación de la velocidad del viento en el tiempo, para una cierta altura sobre el nivel del terreno, y para dos condiciones de rugosidad del terreno. En el primer caso, Fig.(3.1a), las variaciones del registro de velocidad tienen amplitudes pequeñas, mientras que en el segundo caso, fig.(3.1b), la amplitud de las variaciones es bastante grande, pero el valor de la velocidad media, en comparación con el primer caso, es menor; tales diferencias entre ambos casos son debidas a la rugosidad que presenta el terreno (ref.7).

Otro de los aspectos relacionados con la rugosidad del terreno, es la variación de la velocidad con la altura. La fig (3.2) presenta registros de la velocidad del viento, tomados en tres alturas diferentes de una torre (ref.7). En ellos se puede notar que la velocidad media se incrementa con el nivel de altura sobre el terreno, y que las variaciones de las velocidades pico alrededor de la media decrecen con el mismo.

Por lo tanto de acuerdo con lo que se ha dicho, la velocidad del viento se puede dividir en dos componentes: la velocidad media descrita por la componente estática, y una desviación instantánea, conocida como la velocidad de Reynolds, que es descrita por la componente dinámica. La segunda componente

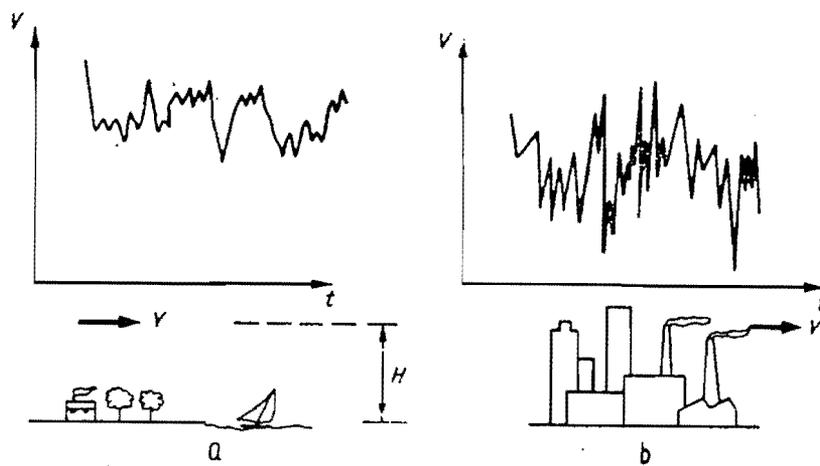
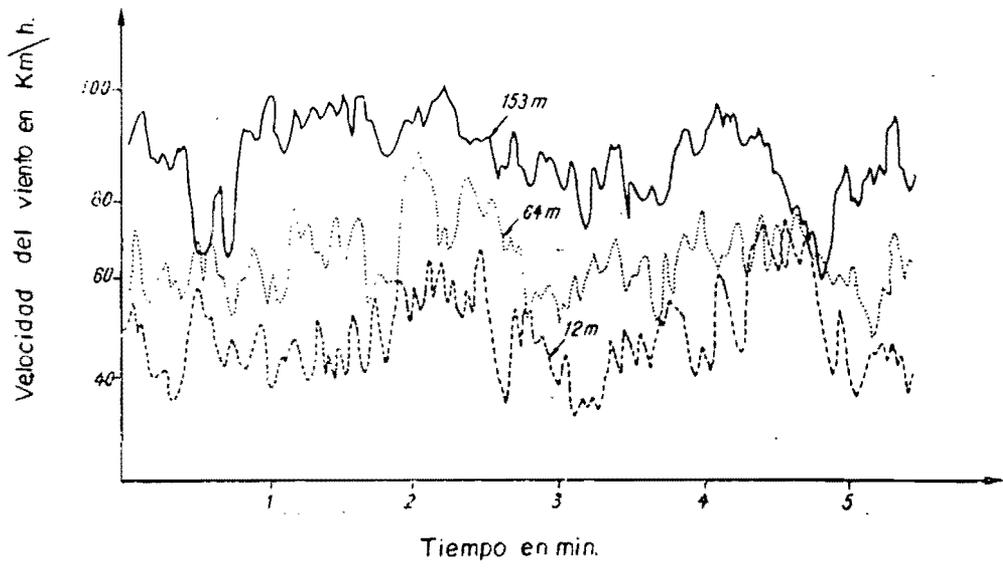


Fig. 3.1 Variación de la velocidad del viento en zonas con diferente rugosidad.



**Fig. 3.2** Velocidad del viento en una torre reportada por Davenport.

puede ser definida solamente recurriendo a la teoría de la probabilidad, como un modelo aleatorio, el cual no es posible tratarlo con leyes deterministas. Tal proceso, entonces, es factible estudiarlo por medio de una función de densidad de probabilidad,  $f(v)$ , que describa a la velocidad del viento  $V$ , pudiendo definir a dicha función con alguna velocidad pico  $V_p$ , asociada con cierta probabilidad,  $p$ , de que  $V$  sea excedida o no. La fig.(3.3) da una explicación más amplia de este concepto (ref.7).

La velocidad pico definida como,

$$P ( V \leq V_p ) = p \quad (3.1)$$

puede ser predicha por la relación estandar.

$$V_p = \bar{V} + K \sigma \quad (3.2)$$

en la cual la velocidad media,  $\bar{V}$ , y la desviación estandar,  $\sigma$ , depende del intervalo de tiempo adoptado para la determinación de la velocidad media.

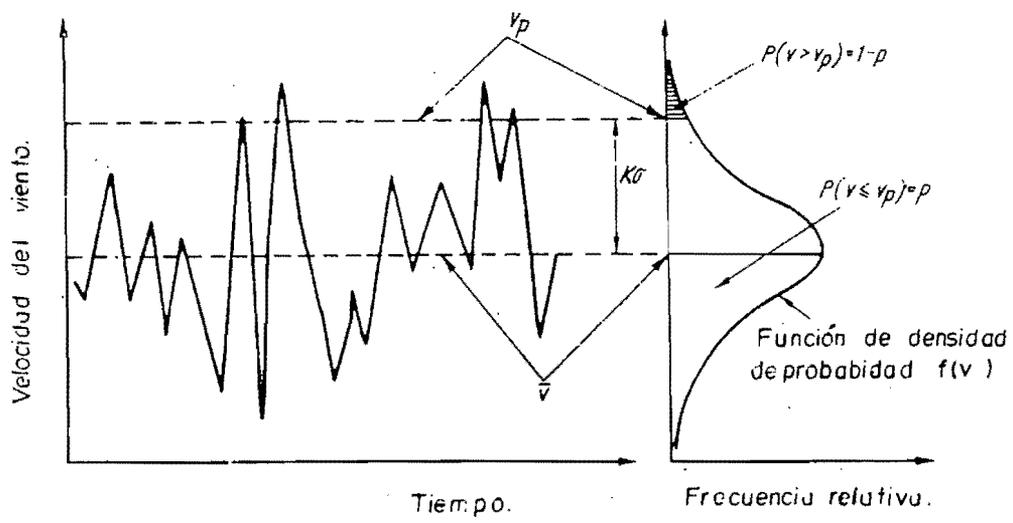
El coeficiente  $K$  depende sobre todo de la probabilidad que define a  $V_p$ , expresado por el número de desviaciones estandar que el valor de la velocidad pico  $V_p$  excede al valor de la velocidad media  $\bar{V}$ .

La ecuación (3.2) se puede reescribir como,

$$V_p = \bar{V} \left[ 1 + K \frac{\sigma}{\bar{V}} \right] \quad (3.3)$$

en la que a la cantidad,  $\sigma/\bar{V}$ , se le conoce como índice de turbulencia,  $I$ .

El índice de turbulencia, es una medida del cambio en la velocidad de Reynolds y por ello también mide la variación de la acción por efectos turbulentos, ya que a medida que el índice aumenta los efectos dinámicos que produce el viento se hacen más notables.



**Fig. 33 Función de densidad de probabilidad.**

Cuando  $I=0$  no existe la velocidad de Reynolds y en consecuencia  $V_p = \bar{V}$ , que se presenta cuando existe flujo laminar.

Cuando  $I \neq 0$ ,  $V_p = \bar{V}(1 + KI)$ , y es costumbre en la literatura, relacionada con viento, llamar al término,  $(1 + KI)$ , factor de amplificación dinámica o factor ráfaga,  $G$ .

Finalmente se ha podido establecer que el índice de turbulencia es altamente sensible a :

- a) El gradiente térmico.
- b) Características topográficas locales.
- c) Topografía general de la zona donde se registra la velocidad del viento.
- d) La curvatura de la superficie terrestre.
- e) La latitud, que modifica la aceleración de Coriolis.

#### 4. - METODOS PARA ESTIMAR EL VALOR MEDIO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

##### 4.1 METODO PRUPUESTO POR GHIOCEL-LUNGU

Como se sabe es posible expresar el efecto del viento en dos componentes, una que varía con el tiempo, y una segunda que es constante durante el mismo, conocida como un valor medio. Así, con base en esto último Ghiocel y Lungu (ref.7) proponen que la respuesta media en la dirección del viento sea descrita por:

$$\bar{Y} = \frac{\bar{F}^*}{\bar{K}^*} \quad (4.1.1)$$

donde:

$\bar{Y}$  desplazamiento medio  
 $\bar{F}^*$  fuerza media generalizada  
 $\bar{K}^*$  rigidez generalizada

La fuerza media generalizada está definida, de acuerdo a la fig.( 4.1.1) como:

$$\bar{F}^* = \iint_A C_D(y,z) \rho \frac{\bar{V}^2(z)}{2} \mu(z) dy dz \quad (4.1.2)$$

donde:

$C_D(y,z)$  coeficiente de arrastre  
 $\rho$  densidad del aire  
 $\bar{V}(z)$  velocidad promedio del viento  
 $\mu(z)$  es una función de forma, correspondiente al primer modo de vibración del edificio

Ahora si el coeficiente  $C_D$  es constante sobre el área  $A=B H$ , la ecuación (4.1.2) se simplifica a la forma siguiente (ver fig. 4.1.1):

$$\bar{F}^* = \frac{C_D \rho B}{2} \int_0^H \bar{V}^2(z) \mu(z) dz \quad (4.1.3)$$

al multiplicar y dividir por H :

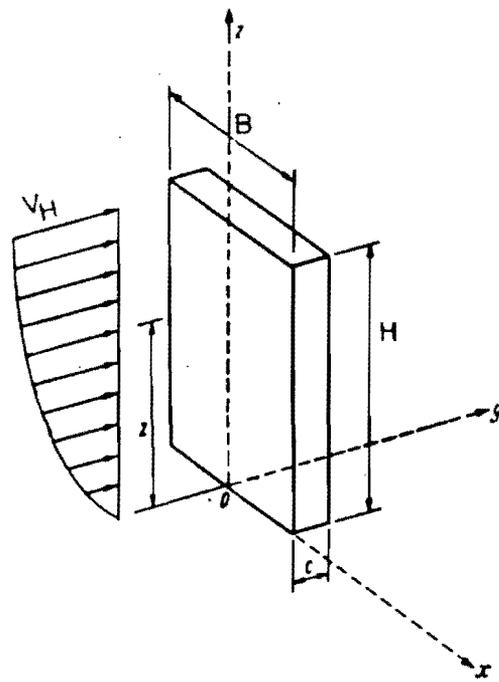


Fig. 4.1.1 Definición de símbolos.

$$\bar{F}^* = \frac{C_D \rho B H}{2} \int_0^1 \bar{V}^2 \left( \frac{z}{H} \right) \mu \left( \frac{z}{H} \right) d \left( \frac{z}{H} \right) \quad (4.1.4)$$

Al sustituir  $V_{(z)}$  como una función  $V_H$  (siendo  $H$  la altura del edificio), propuesta por Davenport (ref.7) para perfiles de velocidad media, definida por:

$$\bar{V}_{(z)} = \bar{V}_H \left( \frac{z}{H} \right)^\alpha \quad (4.1.5)$$

donde:

$\bar{V}_H$                     velocidad media del viento a una altura  $H$   
 $\alpha$                         número adimensional del cual se dan valores en la tabla (2.2.1)

La definición de la función de forma  $\mu \left( \frac{z}{H} \right)$ , depende del tipo de estructuración de que se trate, así por ejemplo de acuerdo a la fig. (4.1.2) (ref.7):

$$\mu \left( \frac{z}{H} \right) = \left( \frac{z}{H} \right)^\epsilon \quad \text{para una estructuración a base de marcos, donde } \epsilon \text{ es un número adimensional.} \quad (4.1.6)$$

$$\mu \left( \frac{z}{H} \right) = \left( \frac{z}{H} \right) \quad \text{para estructuraciones combinadas de marcos y muros de cortante.} \quad (4.1.7)$$

$$\mu \left( \frac{z}{H} \right) = 1 - \cos \frac{\pi z}{2H} \quad \text{para una estructuración a base de muros de cortante.} \quad (4.1.8)$$

Por lo tanto al sustituir las ecuaciones (4.1.5) y (4.1.6), en (4.1.4) se tiene:

$$\bar{F}^* = \frac{C_D H \rho B}{2} \int_0^1 \bar{V}_H^2 \left( \frac{z}{H} \right)^{2\alpha} \left( \frac{z}{H} \right)^\epsilon d \left( \frac{z}{H} \right) \quad (4.1.9)$$

al integrar se obtiene:

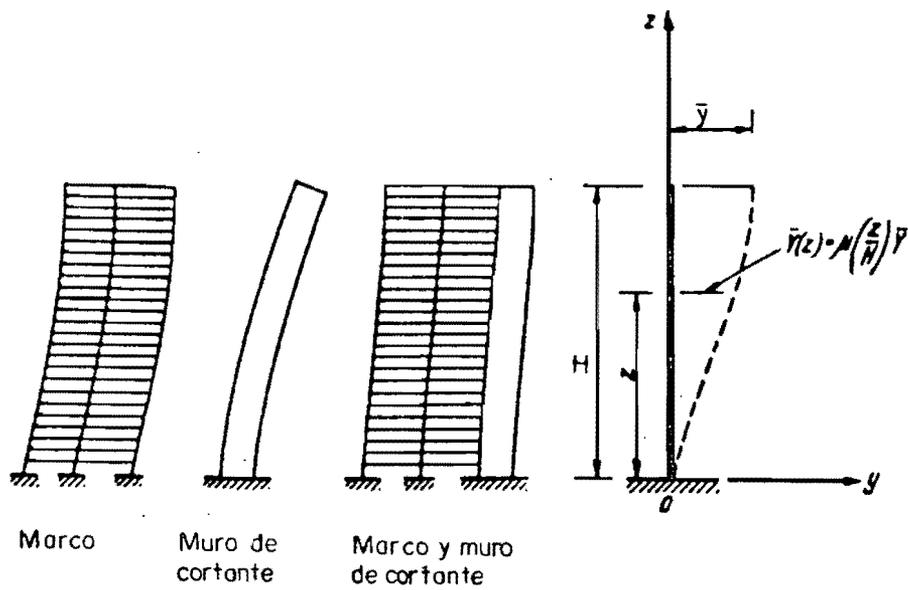


Fig. 4.1.2 Primer modo de vibrar de algunas formas de estructuración.

$$\bar{F}^* = \frac{1}{2\alpha + \epsilon + 1} \frac{C_D \rho B H \sqrt{V}^2}{2} \quad (4.1.10)$$

La rigidez generalizada es función de la masa generalizada,  $M^*$ , y del periodo fundamental del edificio,  $T_D$ , o de su inverso, la frecuencia fundamental,  $n_D$ , quedando definida como:

$$K^* = \frac{4\pi^2}{T_D^2} M^* = 4\pi^2 n_D^2 M^* \quad (4.1.11)$$

o bien :

$$K^* = W_D^2 M^* \quad (4.1.12)$$

donde:

$$W_D = \frac{2\pi}{T_D} = 2\pi n_D \quad (4.1.13)$$

Siendo  $W_D$  la frecuencia angular fundamental de la estructura.

Como se ve para definir  $K^*$  hace falta definir la masa generalizada  $M^*$  la que se puede expresar como:

$$M^* = \int_0^H m(z) \mu^2(z) dz \quad (4.1.14)$$

donde:

$m(z)$  es una función de distribución de masa,  $m(z) = Bc\rho_b$   
(ver figura 4.1.1)

$\rho_b$  densidad promedio de la estructura

entonces:

$$M^* = B c \rho_b \int_0^H \mu^2(z) dz \quad (4.1.15)$$

ahora al multiplicar y dividir por  $H$

$$M^* = B c \rho_b \int_0^1 \mu^2 \left( \frac{z}{H} \right) d \left( \frac{z}{H} \right) \quad (4.1.16)$$

al sustituir (4.1.6) en (4.1.16)

$$M^* = B c \rho_b H \int_0^1 \left( \frac{z}{H} \right)^{2\epsilon} d\left( \frac{z}{H} \right) \quad (4.1.17)$$

integrando:

$$M^* = \frac{B c \rho_b H}{2\epsilon + 1} \quad (4.1.18)$$

al introducir (4.1.18) en (4.1.12)

$$K^* = \frac{W_D^2 B c \rho_b H}{2\epsilon + 1} \quad (4.1.19)$$

finalmente dando valor a  $\bar{F}^*$  y  $K^*$ , la respuesta media es:

$$\bar{Y} = \frac{C_D \rho \bar{V}_H^2}{W_D^2 c \rho_b} \frac{2\epsilon + 1}{2(2\alpha + \epsilon + 1)} \quad (4.1.20)$$

para  $\epsilon = 1$ , es decir para estructuras formadas por marcos y muros de cortante:

$$\bar{Y} = \frac{C_D \rho \bar{V}_H^2}{W_D^2 c \rho_b} \frac{3}{4(\alpha + 1)} \quad (4.1.21)$$

#### 4.2 METODO PROPUESTO POR EL REGLAMENTO DE CANADA DE 1980. (NATIONAL BUILDING CODE 1980 (ref. 2)).

En este reglamento se basa en un procedimiento similar al desarrollado en (4.1) y en las dos premisas siguientes:

- 1) En la excitación de la estructura sólo influye el primer modo de vibración.
- 2) La masa del edificio está distribuida uniformemente.

propone que el desplazamiento medio, en m., en la dirección del viento y en la parte más elevada de edificio quede definido por:

$$\bar{Y} = \frac{3 \int_0^H z P(z) dz}{W_D^2 \rho_b c H^2} \quad (4.2.1)$$

donde:

$\rho_b$  densidad promedio de la estructura, en  $\text{kg/m}^3$   
 $P(z)$  función de distribución de la presión del viento, en  $\text{KN/m}^2$ , tomándose como:

$$P(z) = q C_e C_p \quad (4.2.2)$$

donde:

$q$  presión básica de diseño, en  $\text{KN/m}^2$

$$q = C V_{10}^2 \quad (4.2.3)$$

donde:

$C$  un factor que depende de la presión atmosférica y temperatura del aire, que en Canadá se considera:

si  $\bar{V}_{10}$  está en  $\text{Km/h}$ ;  $C = 50 \times 10^{-6}$

si  $\bar{V}_{10}$  está en  $\text{m/seg}$ ;  $C = 650 \times 10^{-6}$

y  $\bar{V}_{10}$  = velocidad media horaria regional del viento a una altura de 10m. sobre el terreno.

$C_e$  factor de exposición, el cual esta definido como:  
 para áreas abiertas

$$C_e = \left( \frac{z}{10} \right)^{0.28}; C_e \geq 1.0 \quad (4.2.4)$$

para áreas urbanas y suburbanas

$$C_e = 0.5 \left( \frac{z}{12.7} \right)^{0.50}; C_e \geq 0.50 \quad (4.2.5)$$

para centros de ciudades

$$C_e = 0.4 \left( \frac{z}{30} \right)^{0.72}; C_e \geq 0.40 \quad (4.2.6)$$

$C_p$  factor de presión:

para pared de barlovento  $C_{p1} = 0.8$

para pared de sotavento  $C_{p2} = -0.5$

para techo plano  $C_{ps} = -1.0$

H y c deben ser expresadas en m. (literales de finidas en la fig.4.1.1), y  $W_D$  en  $\text{seg}^{-1}$ .

La integral de la ecuación (4.2.1) se debera integrar de acuerdo con la fig.(4.2.1), en la que:

$H_1 = 10$  m. para área de exposición A.

$H_1 = 12.7$  m. para área de exposición B.

$H_1 = 30$  m. para área de exposición C.

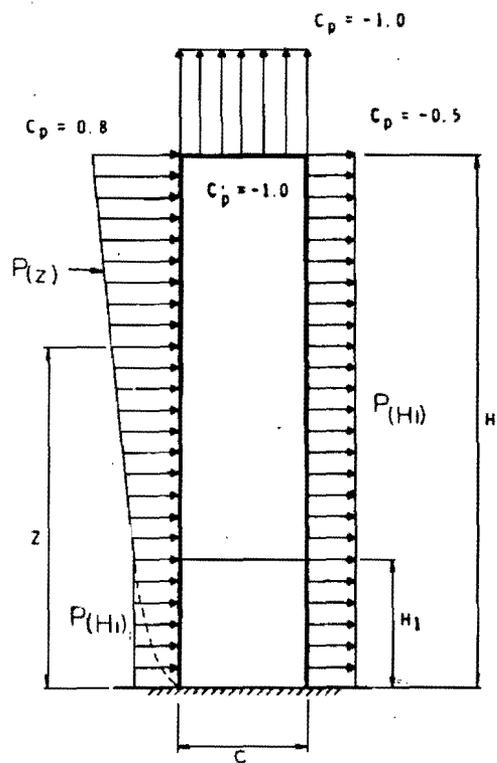


Fig. 4.2.1 Distribución de presión en un edificio.

## 5.- PROCEDIMIENTOS COMUNES PARA ESTIMAR LA ACCION TURBULENTO DEL VIENTO.

### 5.1 INTRODUCCION.

Dentro de este tema se se conocen dos procedimientos para valuar la acción turbulenta del viento, que son:

- 1) Procedimiento determinista.
- 2) Procedimiento estadístico.

de los cuales se mostrarán sus bases, pero para tal efecto, se mencionarán antes algunos aspectos básicos, relacionados con correlación, autocorrelación y correlación cruzada, con el fin de entender mejor los procedimientos citados.

### 5.2 IDEAS SOBRE CORRELACION, AUTOCORRELACION Y CORRELACION CRUZADA.

Para el cálculo de las cargas dinámicas debidas al viento se debe incluir una descripción adecuada de la evolución de la velocidad de las ráfagas en el tiempo y su variación en el espacio, es decir, una descripción completa de las propiedades promedio, espaciales y temporales de las ráfagas. Para lo cual se requiere del conocimiento de las relaciones de cada una de las componentes de la velocidad en un punto  $(x,y,z)$  del espacio, con las correspondientes en otro punto. Esto nos da una idea de la dificultad del problema, puesto que implica la especificación de nueve funciones diferentes, cada una de las cuales depende de siete variables:  $z,y,z,x',y',z'$ , y el tiempo.

Por las razones expuestas, se puede aceptar que el vector velocidad de Reynolds, (Componente dinámica de la velocidad) es :

$$V'(t) = U(t) + V(t) + W(t) \quad (5.2.1)$$

donde:

- $U(t)$             componente de la velocidad paralela al eje x
- $V(t)$             componente de la velocidad paralela al eje y
- $W(t)$             componente de la velocidad paralela al eje z

Para fines de diseño, sólo se tendrá en cuenta la componente longitudinal,  $U(u)$ , del vector velocidad. De esta manera sólo es necesario conocer una de las nueve posibles funciones.

Se define, entonces, la función de autocovariancia de  $U(u)$ , a una altura fija sobre el terreno, como:

$$C(\tau) = \langle U(t)U(t+\tau) \rangle_t \quad (5.2.2)$$

el símbolo  $\langle \rangle_t$  denota un promedio con respecto al tiempo. Así, a partir de la definición anterior, para  $\tau = 0$  tenemos que:

$$C(0) = \langle U^2(t) \rangle_t = \sigma^2(U) \quad (5.2.3)$$

o sea que  $C(0)$  es igual a la variancia de  $U(u)$ . Con frecuencia se usa una versión normalizada de  $C(\tau)$ , la que se conoce como función de correlación  $R(\tau)$ , y se define como:

$$R(\tau) = \frac{C(\tau)}{C(0)} = \frac{C(\tau)}{\sigma^2(U)} \quad (5.2.4)$$

consecuentemente,  $R(\tau)$  es adimensional y toma el valor de uno para  $\tau = 0$  y mientras que para valores de  $\tau$  grandes, tiende a cero.

En las figuras (5.2.1) y (5.2.2) se muestran dos ejemplos de autocorrelaciones medidas en dos sitios diferentes (ref.10).

La autocorrelación  $R(\tau)$  es una medida cuantitativa obtenida de la medición de una de las componentes del vector velocidad de Reynolds ( $U(u)$ ), y correlaciona a la desviación de la velocidad en un instante dado del tiempo, con el valor de esa misma componente, medida  $\tau$  segundos después. Si  $\tau$  es pequeño, será próximo al primero. Si  $\tau$  es grande entonces  $R(\tau) \stackrel{\circ}{=} 0$ , los dos valores serán independientes, y el primer valor no dará ninguna información acerca del segundo.

Algunos autores proponen que la función de autocorrelación se

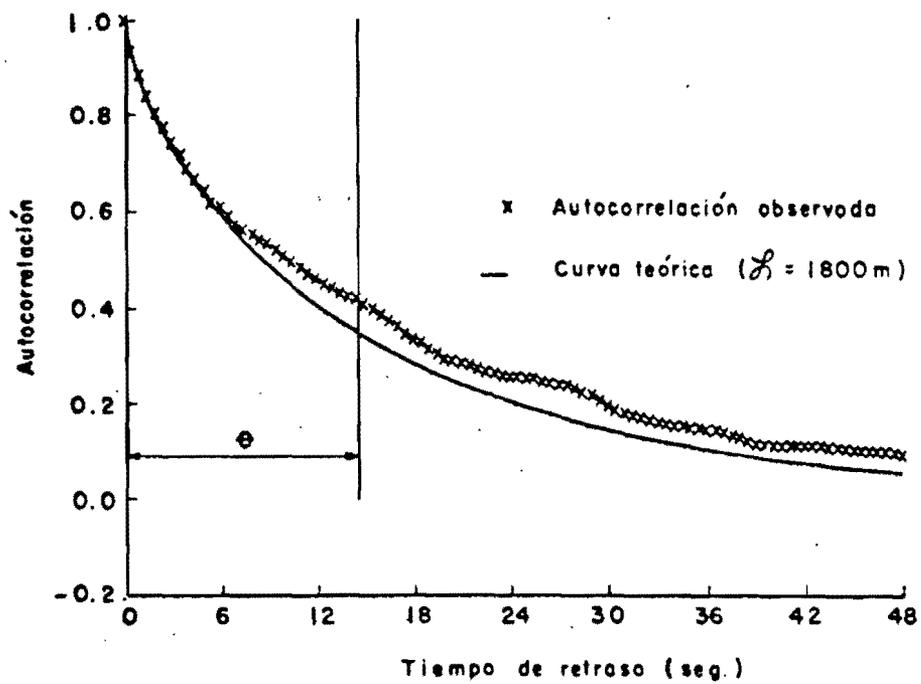


Fig. 5.2.1 Curva de autocorrelacion.

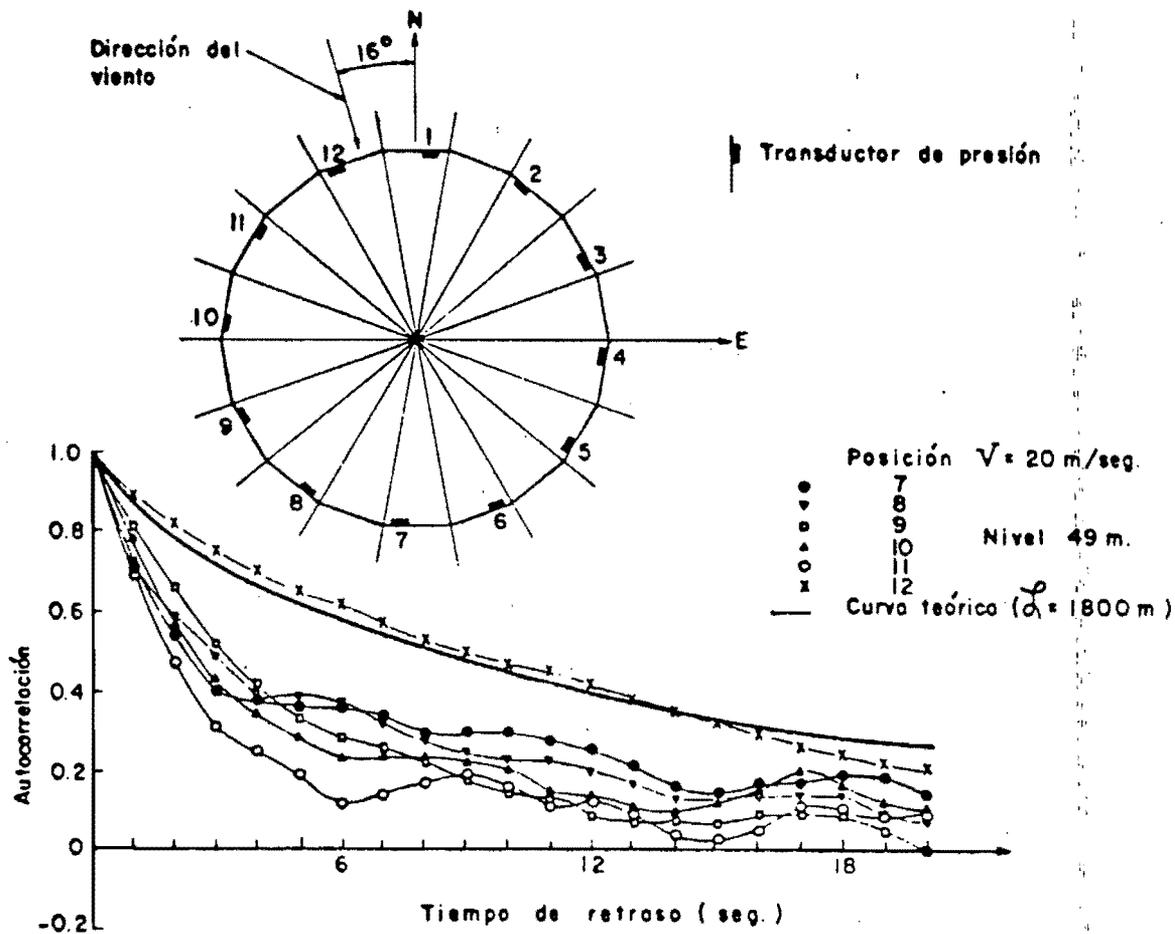


Fig. 5.2.2 Curvas de autocorrelacion.

expresarse como (ref. 5):

$$R(\tau) = e^{-\tau/\theta} \quad (5.2.6)$$

en la escala  $\theta$  es la escala de tiempo, en la cual se presentan los efectos mas importantes del proceso aleatorio del viento, definida por:

$$\theta = \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau \quad (5.2.7)$$

que representa el área bajo la curva de autocorrelación.

Al multiplicar  $\theta$  por  $\bar{V}_{10}$  se obtiene una longitud, que representa una zona del espacio en el cual se manifiesta el fenómeno de turbulencia. Siendo  $\theta\bar{V}_{10}$  una escala de turbulencia que mide indirectamente el tamaño de la ráfaga en la dirección del viento.

Así, al establecer sistemáticamente valores de la función de autocorrelación, de mediciones en vientos turbulentos, se busca establecer valores de  $\theta$  asociados a ráfagas turbulentas.

Para valores de  $\tau < \theta$ , la función de autocorrelación proporciona información razonable acerca de un segundo valor y si  $\tau > \theta$  la información es poco relevante.

La idea de autocorrelación permite establecer un procedimiento matemático para procesar información numérica de registros de velocidad, a fin de estimar la dimensión de las zonas turbulentas en la dirección del viento.

De manera similar se puede establecer el concepto de covariancia cruzada entre dos puntos a distancias  $r$  y  $r'$  del suelo.

Si se toman los valores de velocidades de Reynolds del registro a la altura  $r$  y de aquellas a la altura  $r'$ , se puede definir a la función de covariancia cruzada por:

$$C(r, r', \tau) = \langle U_r(t) U_{r'}(t+\tau) \rangle \quad (5.2.8)$$

Con esta función se intenta correlacionar las velocidades de Reynolds a dos alturas diferentes, cuando  $C(r, r', \tau)$  se normaliza, al dividir entre las desviaciones estándar de cada nivel, se define entonces, la función de correlación cruzada:

$$R(r, r', \tau) = \frac{C(r, r', \tau)}{\sigma_r \sigma_{r'}} \quad (5.2.9)$$

y con un criterio similar al establecido para la función de autocorrelación, se puede llegar a establecer el tamaño de las ráfagas en dirección vertical u horizontal.

Por otro lado es posible establecer que existe relación entre funciones de autocorrelación y densidades de potencia del viento turbulento. Davenport obtuvo que para vientos fuertes el espectro de la componente longitudinal del viento, para diversos sitios y bajo condiciones topográficas diferentes, se puede recurrir a una expresión algebraica que contenga como parámetros, la velocidad media a 10m. de altura y el coeficiente de arrastre superficial  $K$ .

En la literatura se mencionan con frecuencia dos versiones de espectros (ref. 5):

a) Davenport sugirió la expresión siguiente:

$$n S(n) = 4 K \bar{V}_{10}^2 \phi \left( \frac{n \ell}{\bar{V}_{10}} \right)$$

donde:

$S(n)$  densidad espectral, asociada a una frecuencia  $n$ .  
tomando  $\ell = 1200\text{m}$ .

y

$$\phi \left( \frac{n \ell}{\bar{V}_{10}} \right) = \left( \frac{n \ell}{\bar{V}_{10}} \right)^2 \left/ \left[ 1 + \left( \frac{n \ell}{\bar{V}_{10}} \right)^2 \right]^{\frac{4}{9}} \right.$$

b) Harris propone:

$$n S(n) = 4 K \bar{V}_{10} \frac{n \mathcal{L}}{(2 + n^2)^{5/6}} \quad (5.2.10)$$

Para ambas expresiones el coeficiente K es:

$$K = \frac{I_{10}^2}{8} \quad (5.2.11)$$

donde:

$I_{10}$  el índice de turbulencia a una altura de 10m.

De mediciones de campo se han obtenido los valores de K siguientes (ref. 5):

Sobre mar abierto	0.001 — 0.002
Campo abierto	0.003 — 0.005
Suburbios y bosques	0.015 — 0.030
Centro de ciudades	0.030 — 0.050

En resumen, para entender las características que describen a la atmósfera en movimiento, se requiere conocer los parámetros:

- a) Valor medio de la velocidad.
- b) Índice de turbulencia.
- c) La variación de ambos con la altura.
- d) El tamaño de las ráfagas medidas por longitudes obtenidas de mediciones.
- e) El espectro de turbulencia del viento.

### 5.3 METODO DETERMINISTA.

En este método se considera a la estructura subdividida en porciones de rigidez y masa conocida; en cada porción se busca conocer la evolución de las fuerzas del viento a medida que transcurre el tiempo.

Para definir estas fuerzas es necesario conocer la variación

del viento en distintos puntos de la estructura, tomando en cuenta la variación de la turbulencia con la altura.

A continuación se presenta el procedimiento para simular la acción del viento numéricamente, a través del método de "paseos casuales".

### 5.3.1 El viento como proceso estocástico.

La velocidad del viento en un punto cualquiera del espacio se puede modelar como un proceso estocástico multivariacional. Las correlaciones temporales y espaciales del proceso se determinan a partir de mediciones de vientos reales. Las velocidades del viento libre en puntos del espacio se representan por:

$$\left\{ v \right\}_n = \left\{ \bar{v} \right\}_n + \left\{ v'(t) \right\}_n \quad (5.3.1.1)$$

donde:

$\left\{ v \right\}_n$  vector velocidad longitudinal total del viento

$\left\{ \bar{v} \right\}_n$  vector velocidad media

$\left\{ v'(t) \right\}_n$  es el vector que representa la acción turbulenta, componente dinámica ó velocidad de Reynolds, con un valor medio nulo, conocido también como vector ráfaga

Se considera al vector ráfaga formado por dos componentes:

La primera:

$\left\{ u \right\}_n$  Que se denominará de ráfagas grandes, con un contenido de energía en frecuencias menores a la mitad de la frecuencia fundamental de edificios altos, con velocidades altamente correlacionadas y con gran extensión espacial.

La segunda:

$\left\{ v \right\}_n$  De ráfagas pequeñas, con una parte importante de su energía en las frecuencias naturales altas de las estructuras, con baja correlación y una menor extensión espacial, que causa una respuesta dinámica capaz de producir vibraciones importantes en los edificios.

Así, el vector velocidad se representará por:

$$\left\{ v \right\}_n = \left\{ \bar{v} \right\}_n + \left\{ u \right\}_n + \left\{ v \right\}_n \quad (5.3.1.2)$$

La función de autocorrelación para la componente longitudinal de la velocidad de ráfagas, se puede aproximar por:

$$R^{ui} [\tau] = e^{-\tau/\theta} \quad \text{para toda } i \quad (5.3.1.3)$$

donde:

$\theta$  es la escala de tiempo definida por la ec.(5.2.7).

La función de correlación cruzada entre los elementos  $u_i$  y  $u_j$  de ráfagas a una distancia vertical  $r_{ij}$ , para tiempo de retraso nulo, define los valores simultáneos de las componentes de ráfaga  $i$  y  $j$  del espacio, mediante:

$$CR^{u_i u_j} [\tau = 0] = e^{-r_{ij}/\lambda} \quad \text{para toda } i \text{ y } j \quad (5.3.1.4)$$

donde:

$\lambda$  es la escala de longitud de ráfagas grandes.

La correlación cruzada entre elementos  $v_i$  y  $v_j$  de ráfagas pequeñas, con tiempo de retraso nulo es:

$$CR^{v_i v_j} [\tau = 0] = e^{-r_{ij}/\psi} \quad \text{para toda } i \text{ y } j \quad (5.3.1.5)$$

donde:

$\psi$  es la escala de longitud de ráfagas pequeñas.

### 5.3.2 Parámetros para modelar la turbulencia.

Los parámetros  $\theta$ ,  $\lambda$ ,  $\psi$  y  $\sigma^2[V_i]$  son obtenidos de la interpretación matemática de mediciones de viento y se calculan de la manera siguiente:

-Escala de tiempo:

$$\theta = \frac{A}{\bar{V}_{10}} = \frac{151.29}{\bar{V}_{10}} \quad (5.3.2.1)$$

-Escala de longitud para ráfagas pequeñas:

$$\lambda = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \bar{v}_i \right) \frac{\theta}{2} = \bar{v}^* \frac{\theta}{2} \quad (5.3.2.2)$$

-Escala de longitud para ráfagas pequeñas:

$$\psi = \frac{\bar{v}^*}{cf_1} \quad (5.3.2.3)$$

donde:

$c$  es un número adimensional entre 7 y 8 para la componente longitudinal del viento

$f_1$  es la frecuencia fundamental para edificios altos en Hertz.

- La variancia de la turbulencia

$$\sigma^2[V_i] = (\sigma^2[u] + \sigma^2[v]) = \int_0^{\infty} S(n) \, dn \quad (5.3.2.4)$$

donde:

$\sigma^2[u]$  es la variancia de la turbulencia de ráfagas grandes

$\sigma^2[v]$  es la variancia de la turbulencia de ráfagas pequeñas

$S(n)$  es la densidad espectral de potencia del viento, asociada a una frecuencia  $n$

### 5.3.3 Simulación de ráfagas grandes.

El vector de ráfagas grandes  $\{u\}_n$ , se obtiene al generar  $n$  procesos de variancia unitaria sin correlación,  $\{Y\}_n$ , cuyas autocorrelaciones están dadas por la ecuación (5.3.1.3); posteriormente se transforma en  $n$  procesos de variancia unitaria corelacionados  $\{W\}_n$ , con corelaciones cruzadas especificadas por la ecuación (5.3.1.4).

Un elemento de  $\{Y\}_n$ , se forma de una combinación lineal móvil de  $K$  números aleatorios inconexos, con distribución normal, valor medio nulo y variancia unitaria en cada intervalo de tiempo  $\Delta t$ :

$$Y[t] = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_k x_k$$

$$Y[t + \Delta t] = a_1 x_2 + a_2 x_3 + \dots + a_k x_{k+1} \quad (5.3.3.1)$$

$$Y[t + (k-1) \Delta t] = a_1 x_k + a_2 x_{k+1} + \dots + a_k x_{2k-1}$$

Las constantes  $a_i$  se obtienen de resolver un conjunto de ecuaciones no lineales, formadas por la covariancia del proceso  $\{Y\}_n$ , de manera que corresponda a las autocorrelaciones definidas por la ecuación (5.3.1.3). La covariancia de  $Y[t]$  con:  $Y[t + (j-1) \Delta t]$  es:

$$\text{Cov} \left\{ Y[t], Y[t + (j-1) \Delta t] \right\} = a_1 a_j + a_2 a_{j+1} + \dots + a_{k-j+1} a_k$$

para  $j = 1, 2, \dots, k.$  (5.3.3.2)

el valor de  $k$  se escoge por conveniencia de cálculo, por ejemplo  $k=17$ .

Los  $n$  procesos de variancia unitaria corelacionados  $\{W\}_n$ , se forman mediante la transformación siguiente:

$$\{W\}_n = [D] \{Y\}_n \quad (5.3.3.3)$$

en la que los elementos de la matriz triangular inferior [D], se obtiene de la matriz de correlación cruzada de  $\{ W \}_n$  definida por:

$$\left[ CR^{w_i w_j}(\tau=0) \right] = [D] [I] [D]^T \quad (5.3.3.4)$$

los elementos de la matriz [CR] se calculan con la ecuación (5.3.3.4). Así, el vector de ráfagas grandes se calcula mediante:

$$\left\{ U \right\}_n = \left[ \sigma^2(u) \right] \left\{ W \right\}_n \quad (5.3.3.5)$$

#### 5.3.4 Espectro de potencia de ráfagas grandes.

Para definir la variancia de la turbulencia de ráfagas grandes, es necesario definir el espectro de potencia de ráfagas grandes y según Bendat (ref.10), si la función de autocorrelación está expresada por una función exponencial, como la ecuación (5.3.1.3), entonces la función de densidad espectral de potencia puede aproximarse por:

$$S_{RG}(n) = \frac{4 \left[ \frac{I_{10}^2}{6} \right] \bar{V}_{10}^2}{n} \frac{X}{1+X^2} \quad (5.3.4.1)$$

donde:

$$X = 2\pi n \lambda$$

$$\lambda = 151.29 / \bar{V}_{10}$$

n es la frecuencia

#### 5.3.5 Simulación de ráfagas pequeñas.

El vector de ráfagas pequeñas  $\{ v \}_n$ , se obtiene de generar primero n procesos sin correlación,  $\{ p \}_n$  en intervalos de tiempo discretos,  $\Delta S$ . Cada proceso  $p(t)$  se simula por la serie:

$$p(t) = \sum_{j=0}^{N_i-1} [ 2 S(n_j) \Delta n ]^{1/2} \cos [ 2\pi n_j t + \phi_j ] \quad (5.3.5.1)$$

en la cual el intervalo de frecuencias,  $n_j$ , comprende a las frecuencias naturales más bajas del edificio.  $S(n_j)$  es la diferencia entre el valor supuesto del espectro de velocidad del viento en el sitio y los valores calculados del espectro de potencia para las ráfagas grandes definido por la ecuación (5.3.4.1). Los ángulos de fase,  $\phi_j$ , son desviaciones aleatorias uniformemente distribuidas entre 0 y  $2\pi$ .

Los procesos  $p(t)$  se transforman en  $n$  procesos correlacionados, usando la matriz de correlción, [CR], empleada para ráfagas grandes; cuyos elementos quedan descritos por la ecuación (5.3.1.4).

### 5.3.6 Selección de los intervalos de tiempo $\Delta t$ y $\Delta S$ .

La literatura recomienda que tales valores sean (ref.10):

$$\Delta t = \frac{1}{f_1} \quad (5.3.6.1)$$

$$\Delta S = \frac{1}{n_u - n_1} \quad (5.3.6.2)$$

donde:

$f_1$  frecuencia del primer modo de vibrar de la estructura

$f_u$  frecuencia del último modo de vibrar de la estructura

$$n_u = 2f_u$$

$$n_1 = \frac{f_1}{2}$$

### 5.3.7 Fuerzas inducidas por el viento.

Las fuerzas del viento  $F_i$ , en áreas tributarias de las masas de la estructura, se obtienen de las correspondientes velocidades  $V_i$ , por medio de la expresión:

$$F_i = \frac{1}{2} \rho C_{Dd} A_i V_i^2 \quad (5.3.7.1)$$

donde:

$\rho$  densidad del aire  
 $C_{Dd}$  coeficiente de presión dinámica  
 $A_i$  área tributaria para la masa  $i$   
 $V_i$  velocidad del viento =  $\bar{V} + V'(t)$

El coeficiente  $C_{Dd}$  se define como:

$$C_{Dd} = \sqrt{X_a^2} C_D \quad (5.3.7.2)$$

donde:

$$X_a^2 = \frac{1}{1 + \left[ \frac{2 \sqrt{A}}{T_D \bar{V}_{10}} \right]^4 / 3}$$

en la que  $A$  es el área total expuesta y  $T_D$  es el periodo fundamental de la estructura.

El coeficiente de presión promedio o coeficiente de arrastre  $C_D$ , depende de la forma y dimensiones de la estructura, así como del tipo de flujo que se presente.

#### 5.4 METODO ESTADISTICO PARA ESTIMAR LA RESPUESTA DINAMICA DE ESTRUCTURAS SUJETAS A LA ACCION TURBULENTO DEL VIENTO.

Este método considera la energía transferida por la turbulencia del viento a la estructura, buscando el espectro de respuesta para desplazamientos mediante un modelo sencillo de un grado de libertad. Para ello se aplican procedimientos numéricos simplificados mediante el concepto del factor de amplificación  $G$ .

Una vez que se conoce  $G$  para una estructura dada, y la respuesta  $\bar{Y}$  bajo flujo laminar, es posible conocer la respuesta dinámica bajo viento turbulento, al efectuar el producto  $\bar{Y} G$ , por tal motivo en seguida se llevará a cabo la obtención detallada del factor de amplificación  $G$ .

### 5.4.1 Teoría de comunicación y la respuesta dinámica debida a excitación aleatoria.

En la teoría de comunicación, un sistema es definido como un ente físico que convierte una función de entrada o función de fuerza,  $f(t)$ , en una función de salida o función de respuesta,  $y(t)$ , ver figura(5.4.1.1). La salida depende de la entrada y de las características físicas del sistema.

Un sistema es llamado lineal si la función de entrada,  $af_1(t) + bf_2(t)$ , es convertida un una función de salida,  $ay_1(t) + by_2(t)$ , donde  $y_1(t)$  y  $y_2(t)$  son las funciones de salida, producidas separadamente por el sistema de entrada  $f_1(t)$  y  $f_2(t)$  respectivamente, a y b son constantes arbitrarias.

Un sistema físico es llamado invariante si la conversión de una función de entrada,  $f(t)$ , produce  $y(t)$  y cuando se aplica  $f(t+t_0)$  se produce  $y(t+t_0)$ , donde  $t_0$  es un tiempo cualquiera.

Un sistema lineal invariante en el tiempo se define por un par de transformadas de Fourier, su función de respuesta a un impulso,  $h(t)$  y su transformada de Fourier  $H(\omega)$ , tales que:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (5.4.1.1)$$

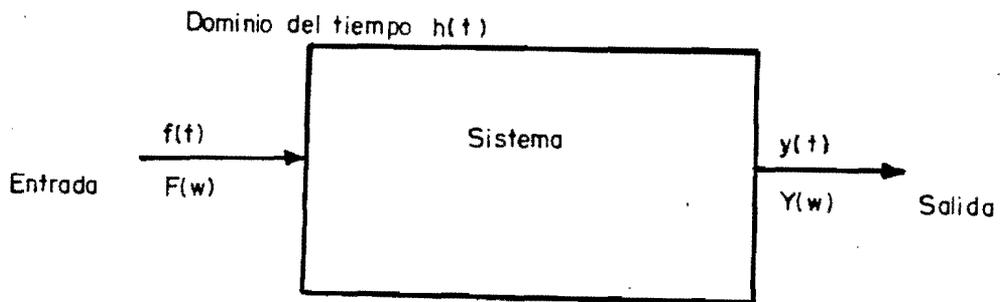
$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \quad (5.4.1.2)$$

donde:

$\omega$  frecuencia angular del sistema

$i = \sqrt{-1}$

La función de impulso,  $h(t)$  es la respuesta del sistema, producida por un impulso unitario, similar a una función delta de Dirac, es decir  $f(t) = \delta(t)$ .



Dominio de frecuencias  $H(w)$

Fig. 8.4.1.1 Representación esquemática de un sistema.



DEPFI

La función de transferencia  $H(\omega)$  es una función compleja de la frecuencia de excitación,  $H(\omega) = A(\omega) + iB(\omega)$ , definida como la relación de la respuesta estacionaria,  $y(t)$ , resultante de una vibración forzada, a la entrada armónica  $f(t) = e^{i\omega t}$  que produce la vibración forzada.

Si las transformadas de Fourier de  $f(t)$  y  $h(t)$  son  $F(\omega)$  y  $Y(\omega)$  :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (5.4.1.3)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (5.4.1.4)$$

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Y(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (5.4.1.5)$$

$$Y(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-i\omega t} d\omega \quad (5.4.1.6)$$

Se puede mostrar que en el dominio de frecuencia, la transformada de Fourier del sistema de salida  $Y(\omega)$ , es el producto de la transformada de Fourier de la entrada,  $F(\omega)$ , y la función de transferencia,  $H(\omega)$ , es decir:

$$Y(\omega) = H(\omega) F(\omega) \quad (5.4.1.7)$$

Cuando la entrada y salida son estacionarias, el espectro de densidad de potencia de la salida del sistema, puede ser escrito como:

$$S_y(\omega) = |H(\omega)|^2 S_F(\omega) \quad (5.4.1.8)$$

Esta relación muestra que el espectro de densidad de potencia de la salida del sistema, es el producto del espectro de densidad de potencia de la función de entrada,  $S_F(\omega)$ , por el cuadrado del módulo de la función de transferencia del sistema  $|H(\omega)|^2$ . Resulta

obvio que,  $|H(\omega)|^2$  da la fracción de energía que transmite el sistema en cada frecuencia, ver fig.(5.4.1.2).

Una breve descripción del método, aplicado a un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento se muestra a continuación.

La ecuación de movimiento, que resulta del equilibrio dinámico de todas la fuerzas que actúan en el sistema, es de acuerdo al principio de D'Alambert (ver fig.(5.4.1.3)):

$$-F_i + F_d + F_s - f(t) = 0 \quad (5.4.1.9)$$

donde:

- $F_i$  fuerza de inercia proporcional a la aceleración
- $F_d = C\dot{y}(t)$  fuerza de amortiguamiento viscoso
- $F_s = ky(t)$  fuerza del resorte proporcional al desplazamiento
- $f(t)$  fuerza externa aplicada en la masa del sistema

La teoría estadística de la dinámica estructural, asume que sólo la fuerza externa y los desplazamientos que induce, son procesos estocásticos, siendo los parámetros restantes del tipo determinístico. Por tanto la ecuación diferencial estocástica de segundo orden que gobierna el movimiento del sistema típico masa-resorte-amortiguador es:

$$m\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + ky(t) = f(t) \quad (5.4.1.10)$$

donde:

- $y(t)$  desplazamiento estocástico de la masa a partir de la posición del equilibrio
- $\dot{y}(t)$  velocidad estocástica
- $\ddot{y}(t)$  aceleración estocástica
- $f(t)$  fuerza estocástica externa actuando en la masa
- $C$  coeficiente de amortiguamiento viscoso
- $k$  constante del resorte
- $m$  masa del sistema

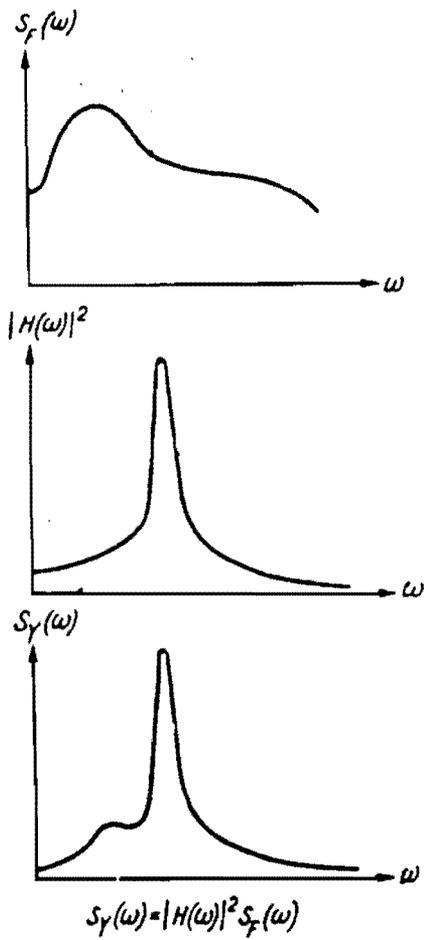


Fig. 5.4.1.2 Sistema lineal con entrada y salida estacionarias.

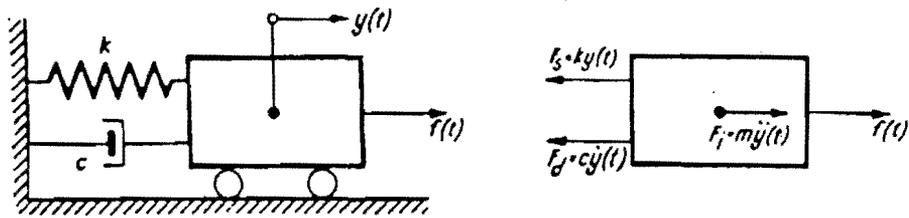


Fig. 5.4.13 Sistema de un grado de libertad.

Usando la notación,

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (5.4.1.11)$$

$$\beta_0 = \frac{C}{2m\omega_0} = \frac{C}{2\sqrt{mk}} \quad (5.4.1.12)$$

la ecuación (5.4.1.10) puede escribirse en la forma estándar:

$$\ddot{y}(t) + 2\beta_0 \omega_0 \dot{y}(t) + \omega_0^2 y(t) = \frac{f(t)}{m} \quad (5.4.1.13)$$

donde:

$\omega_0$  frecuencia angular natural no amortiguada del sistema.

$\beta_0$  es la relación de amortiguamiento crítico

A fin de obtener la función de transferencia del sistema, se puede tomar la transformada de Fourier de la ecuación (5.4.1.10) y se obtiene:

$$m \left[ -\omega^2 Y(\omega) - i\omega y(0) - \dot{y}(0) \right] + C \left[ i\omega Y(\omega) - y(0) \right] + kY(\omega) = F(\omega)$$

Al despejar para  $Y(\omega)$ :

$$Y(\omega) = \frac{F(\omega) + m\dot{y}(0) + (im\omega + C) y(0)}{-m\omega^2 + iC\omega + k} \quad (5.4.1.15)$$

Cuando se obtiene una respuesta estacionaria:

$$Y(\omega) = \frac{F(\omega)}{-m\omega^2 + iC\omega + k} \quad (5.4.1.16)$$

ya que  $y(0)=0$  e  $\dot{y}(0)=0$

Por tanto, por definición la función de transferencia del sistema,  $H(\omega)$  es:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{-m\omega^2 + iC\omega + k} \quad (5.4.1.17)$$

Al introducir  $w_0^2 = \frac{k}{m}$  y  $\beta_0 = \frac{c}{2mw_0}$  la ecuación (5.4.1.17) puede reescribirse como:

$$HC(w) = \frac{1}{w_0^2} = \frac{1}{m \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{w}{w_0} \right)^2 \right] + i \left( 2\beta_0 \frac{w}{w_0} \right) \right\}} = \frac{1}{k} \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{w}{w_0} \right)^2 \right] + i \left( 2\beta_0 \frac{w}{w_0} \right)} \quad (5.4.1.18)$$

Finalmente al elevar al cuadrado:

$$|HC(w)|^2 = \frac{1}{k^2} \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{w}{w_0} \right)^2 \right]^2 + 4\beta_0^2 \left( \frac{w}{w_0} \right)^2} = \frac{1}{k^2} |Hr(w)|^2 \quad (5.4.1.19)$$

Los resultados obtenidos para sistemas de grado de libertad pueden extenderse para sistemas de varios grados de libertad, si la configuración del sistema es tal, que la contribución de modos vibración superiores al primero puedan ser ignorados.

Este es el caso típico de edificios de muchos niveles, en los cuales se pueden hacer la aproximación a un grado de libertad mediante la definición de propiedades generalizadas definidas, bajo el marco de referencia de la figura(4.1.1), como:

$$\text{Masa generalizada} \quad M^* = \int_0^H m(z) \mu^2(z) dz \quad (5.4.1.20)$$

$$\text{Fuerza generalizada} \quad F^*(t) = \int_0^H f(z,t) \mu(z) dz \quad (5.4.1.21)$$

$$\text{Rigidez generalizada} \quad K^* = w_0^2 M^* \quad (5.4.1.22)$$

donde:

$m(z)$             función de distribución de la masa del edificio  
 $f(z,t)$         función de fuerza aplicada al edificio

$\mu(z)$  función de forma, definida en la sección (4.1)

Así la ecuación de movimiento generalizada puede escribirse como:

$$\ddot{y}(t) + 2 \beta_0 \omega_0 \dot{y}(t) + \omega_0^2 y(t) = \frac{F^*(t)}{M^*} \quad (5.4.1.23)$$

donde:

$$\omega_0 = \frac{K^*}{M^*}$$

$$\beta_0 = \frac{c}{2M^*\omega_0} = \frac{c}{2\sqrt{M^*K^*}}$$

Finalmente, al sustituir los correspondientes valores en la ecuación (5.4.1.19):

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{K^{*2}} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4\beta_0^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} = \frac{1}{K^{*2}} |H(\omega)|^2 \quad (5.4.1.24)$$

#### 5.4.2 Aproximación estocástica del factor de amplificación, G.

La fuerza generalizada que actúa en la estructura,  $F^*(t)$ , puede ser separada en dos componentes: una fuerza media resultado de la velocidad media del viento,  $\bar{F}^*$ , y una fuerza variable en el tiempo resultado de la velocidad dinámica,  $F'(t)^*$ , es decir:

$$F(t)^* = \bar{F}^* + F'(t)^* \quad (5.4.2.1)$$

Consecuentemente, el desplazamiento lateral inducido  $Y(t)$ , puede ser separado en dos componentes; una debida a la fuerza media generalizada  $\bar{Y}$ , y un desplazamiento variable en el tiempo  $Y'(t)$ , debido a la fuerza generalizada variable en el tiempo, es decir:

$$Y(t) = \bar{Y} + Y'(t) \quad (5.4.2.2)$$

Las componentes medias de  $F(t)^*$  y  $Y(t)$  han sido calculadas en la sección (4.1). Las componentes variables en el tiempo de  $F(t)^*$  y  $Y(t)$  son calculadas bajo la base de un proceso aleatorio estacionario Gaussiano con media cero.

Con la premisa anterior, es posible calcular los valores máximos  $Y_p$ , de  $Y(t)$ , con la siguiente relación estandar:

$$Y_p = \bar{Y} \left[ 1 + g \frac{\sigma_{Y'}}{\bar{Y}} \right] \quad (5.4.2.3)$$

donde:

$\sigma_{Y'}$ , es la desviación estandar de  $Y'(t)$

$\bar{Y}$  desplazamiento medio horario, generado por  $\bar{F}$

$g$  factor pico que depende de la probabilidad  $p$  que define a  $Y_p$ , ver fig.(5.4.2.1).

$$P(Y \leq Y_p) = p \quad (5.4.2.4)$$

El factor de amplificación de la respuesta se define como:

$$G = 1 + g \frac{\sigma_{Y'}}{\bar{Y}} \quad (5.4.2.5)$$

el cual intenta transformar el fenómeno de la respuesta dinámica, producido por las ráfagas de viento, en un criterio simple de diseño estático.

Por tanto hará falta definir el factor pico,  $g$ , y el factor  $\frac{\sigma_{Y'}}{\bar{Y}}$ , lo que se calcula en las siguientes secciones.

#### 5.4.3 Factor pico, $g$ .

En la literatura se mencionan diferentes valores de  $g$ , propuestos por diferentes autores (ref.7), como:

- a) Vellozzi y Cohen proponen  $g = 3$  con  $p(Y \leq Y_p) = 0.99865$

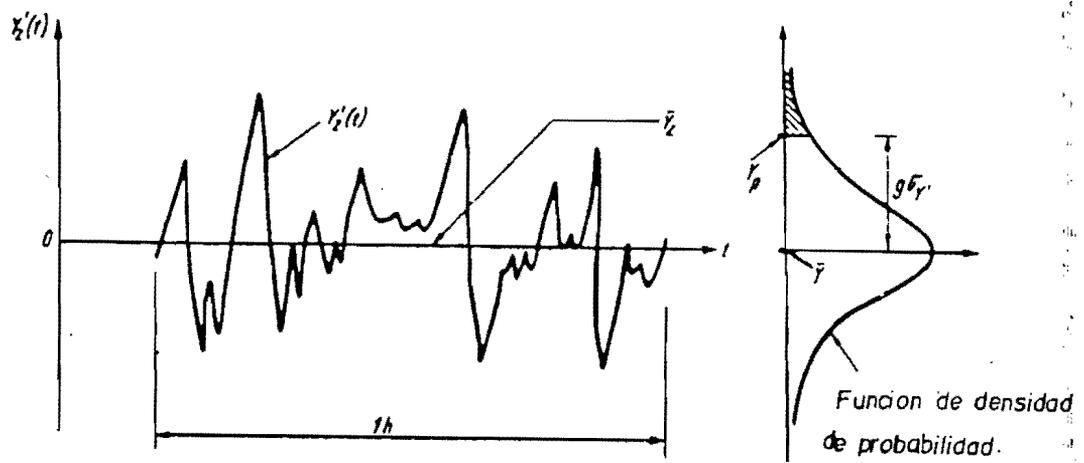


Fig. 5.4.2.1 Significado de la componente variable de la respuesta estructural.

- b) Vickery propone  $g = 3.5$  con  $p(Y \leq Y_p) = 0.999767$   
 c) Davenport propone:

$$g = \sqrt{2 \ln \nu T} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln \nu T}} \quad (5.4.3.1)$$

en la que  $\nu$  es la moda del espectro de turbulencia del viento, y  $T$  es el tiempo en el cual se calcula el promedio de la velocidad media del viento.

El valor de  $\nu$  se define por:

$$\nu = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} n^2 S_Y(n) \, dn}{\int_0^{\infty} S_Y(n) \, dn}} \quad (5.4.3.2)$$

donde:

$S_Y(n)$  densidad del espectro de la respuesta variable en el tiempo, asociado a una frecuencia  $n$   
 $n$  frecuencia

#### 5.4.4 Definición del factor $\frac{\sigma_Y}{\bar{Y}}$ .

La variancia del desplazamiento variable con el tiempo, es obtenida del espectro de densidad de potencia  $S_Y(\omega)$ :

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_Y(\omega) \, d\omega \quad (5.4.4.1)$$

Así mismo el espectro de  $Y'(t)$  puede ser relacionado, de acuerdo con la ecuación (5.4.1.8), con el espectro de densidad de potencia de la fuerza generalizada variable  $F'(t)$ , mediante:

$$S_{Y'}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_F(\omega) \quad (5.4.4.2)$$

entonces, la variancia de  $Y'$  puede ser expresada por:

$$\sigma_{Y'}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} |H(\omega)|^2 S_F(\omega) d\omega \quad (5.4.4.3)$$

Para el cálculo del espectro  $S_{F'}(\omega)$ , es necesario conocer  $F'(t)$ . Por tanto, si consideramos, con similitud a las expresiones (5.4.2.1) y (5.4.2.2), que la velocidad es (ver fig.4.1.1):

$$V_z(t) = \bar{V}_z + V'_z(t) \quad (5.4.4.4)$$

de acuerdo con el marco de referencia de la figura(4.1.1), se puede considerar entonces, que la presión es:

$$P_z(t) = \bar{P}_z + P'_z(t) \quad (5.4.4.5)$$

al elevar al cuadrado la expresión (5.4.4.4) y multiplicar por  $\rho/2$ , siendo  $\rho$  la densidad del aire:

$$\frac{\rho}{2} V_z^2(t) = \frac{\rho}{2} \left\{ \bar{V}_z^2 + 2\bar{V}_z V'_z(t) + V_z'^2(t) \right\} \quad (5.4.4.6)$$

Si se acepta que:  $\bar{P}_z = \frac{\rho}{2} \bar{V}_z^2$  y  $V_z'^2(t)$  es despreciable, se tiene:

$$P_z(t) = \bar{P}_z + \frac{\rho}{2} \left[ 2\bar{V}_z V'_z(t) \right] \quad (5.4.4.7)$$

por lo que:

$$P'_z(t) = \rho \bar{V}_z V'_z(t) \quad (5.4.4.8)$$

de manera que  $F'(t)$  se puede expresar como:

$$F'(t) = \iint_A C_D(y,z) \left[ \rho \bar{V}_z(z) V'_z(t) \right] dy dz \quad (5.4.4.9)$$

y con base en el teorema del valor medio:

$$F'(t) = V'(t) \left[ \iint_A C_D(y,z) \rho \bar{V}(z) \mu(z) dy dz \right] \quad (5.4.4.10)$$

si el coeficiente de arrastre,  $C_D(y,z)$ , es constante, en toda área expuesta,  $B H$ , de la estructura, la expresión (5.4.4.10), se simplifica a (ver fig. 4.1.1):

$$\begin{aligned} F'(t) &= V'(t) \left[ C_D \rho B \int_0^H \bar{V}(z) \mu(z) dz \right] = \\ &= V'(t) \left[ C_D \rho B H \int_0^1 \bar{V}\left(\frac{z}{H}\right) \mu\left(\frac{z}{H}\right) d\left(\frac{z}{H}\right) \right] \end{aligned} \quad (5.4.4.10 A)$$

tomando  $\bar{V}\left(\frac{z}{H}\right) = \bar{V}_H \left(\frac{z}{H}\right)^\alpha$  y  $\mu\left(\frac{z}{H}\right) = \left(\frac{z}{H}\right)^\varepsilon$  ecuaciones propuestas en la sección (4.1), en las que  $\alpha$  y  $\varepsilon$  son números adimensionales,  $F'(t)$  se transforma en:

$$\begin{aligned} F'(t) &= V'(t) \left[ C_D \rho B H \int_0^1 \bar{V}_H \left(\frac{z}{H}\right)^\alpha \left(\frac{z}{H}\right)^\varepsilon d\left(\frac{z}{H}\right) \right] = \\ &= V'(t) \left[ \frac{1}{\alpha + \varepsilon + 1} C_D \rho B H \bar{V}_H \right] \end{aligned} \quad (5.4.4.11)$$

al sustituir  $\varepsilon = 1$

$$F'(t) = \left[ \frac{C_D \rho B H \bar{V}_H}{\alpha + 2} \right] V'(t) \quad (5.4.4.12)$$

Al comparar la expresión anterior con la ecuación (5.4.1.8) el espectro de densidad de potencia de  $F'(t)$ , se puede definir:

$$S_{F'}(\omega) = \left[ \frac{C_D \rho B H \bar{V}_H}{\alpha + 2} \right]^2 S_{V'}(\omega, A) \quad (5.4.4.13)$$

en la que  $S_{V'}(\omega, A)$  es el espectro de correlación cruzada de la velocidad de Reynolds.

Al considerar que la componente longitudinal de la velocidad de ráfaga actúa en un plano normal al plano medio de la estructura, el espectro de correlación cruza entre dos puntos,  $i$  y  $j$ , se puede calcular como:

$$S_{V,}(w, \Delta ij) = R(w, \Delta ij) S_{V,}(w) \quad (5.4.4.14)$$

en la que  $\Delta ij$  es la distancia entre los puntos  $i$  y  $j$ , y  $R(w, \Delta ij)$  es la función de coherencia. Para una área expuesta  $A$ , normal a la velocidad media del viento, entonces:

$$\begin{aligned} S_{V,}(w, A) &= \left[ \iint_A R(w, \Delta ij) d_A \right] S_{V,}(w) = \\ &= C^2(w, A), S_{V,}(w) \end{aligned} \quad (5.4.4.15)$$

donde:

$C(w, A)$  es la función de correlación cruzada o función de transfencia

$S_{V,}(w)$  es el espectro de densidad de potencia de la velocidad variable en el tiempo o velocidad de Reynolds

Al sustituir la ecuación (5.4.4.15) en (5.4.4.13):

$$S_{F,}(w) = \left[ \frac{C_D \rho B H \bar{V}_H^2}{\alpha + 2} \right] C^2(w, A) S_{V,}(w) \quad (5.4.4.16)$$

Al introducir la ecuación (5.4.4.16) en la ecuación (5.4.4.3):

$$\sigma_{Y,}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} |H(w)|^2 \left[ \frac{C_D \rho B H \bar{V}_H^2}{\alpha + 2} \right] C^2(w, A) S_{V,}(w) dw \quad (5.4.4.17)$$

Con el siguiente cambio de variable:

$$w = 2\pi n \quad (5.4.4.18)$$

donde:

$n$  frecuencia del sistema.

Y ya que  $|H(w)|^2$ , se transforma en  $\frac{|H_r(n)|^2}{K^2}$ ,  $\sigma_{Y,}^2$  es:

$$\sigma_{Y'}^2 = \int_0^{\infty} \left[ \frac{C_D \rho b h \bar{v}_h}{\alpha + 2} \right]^2 \frac{|H_r(n)|^2}{K^{*2}} C^2(n, A) S_{V'}(n) dn \quad (5.4.4.19)$$

por lo tanto la desviación estandar de  $Y'$ ,  $\sigma_{Y'}$ , dividida entre la respuesta media  $\bar{Y}$ , tomada esta última de la ecuación (4.1.21), será:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{Y'}}{\bar{Y}} &= \frac{\sqrt{\int_0^{\infty} S_{Y'}(n) dn}}{\bar{Y}} = \\ &= \frac{2(2\alpha+2)}{(\alpha+2)} \frac{1}{\bar{v}_H} \sqrt{\int_0^{\infty} |H_r(n)|^2 C^2(n, A) S_{V'}(n) dn} \quad (5.4.4.20) \end{aligned}$$

Al seleccionar el espectro de densidad de potencia propuesto por Davenport:

$$S_{V'}(n) = 4K \bar{v}_{10}^2 \frac{X^2(n)}{n [1 + X^2(n)]^{4/3}} \quad (5.4.4.21)$$

donde:

$K$  es un factor relacionado con la rugosidad de la superficie del terreno, correspondiente a  $\bar{v}_{10}$

$\bar{v}_{10}$  velocidad media del viento a una altura de 10m.

$X(n) = \frac{n \ell}{\bar{v}_{10}}$  donde  $n$  = frecuencia y  $\ell$  = a una longitud en m.

Al sustituir la ecuación (5.4.4.21) en la (5.4.4.20) se tiene:

$$\frac{\sigma_{Y'}}{\bar{Y}} = \frac{2(2\alpha+2)}{\alpha+2} \left( \frac{10}{H} \right)^\alpha \sqrt{4K \int_0^{\infty} |H_r(n)|^2 C^2(n, A) \frac{X^2(n)}{n [1 + X^2(n)]^{4/3}} dn} \quad (5.4.4.22)$$

Si la función de transferencia  $|H_r(n)|^2$  es igual a 1 para todas las frecuencias, excepto para la frecuencia natural de la estructura  $n_0$ , Davenport sugiere que la ecuación (5.4.4.22) se

transforme en:

$$\frac{\sigma_{y'}}{\bar{y}} = \frac{2(2\alpha+2)}{\alpha+2} \left(\frac{10}{H}\right)^{\alpha} *$$

$$* \sqrt{K\pi C^2(n_o, A) \frac{x^2(n_o)}{\beta_o [1 + x^2(n_o)]^{4/3}} + 4K \int_0^{\infty} C^2(n, A) \frac{x^2(n)}{n [1 + x^2(n)]^{4/3}} dn}$$

$\downarrow \rightarrow 2$ 
 $\downarrow \rightarrow 1$

(5.4.4.23)

La interpretación geométrica de la ecuación (5.4.4.23) se muestra en la fig.(5.4.4.1), en la que se representan las áreas ocupadas por los elementos 1 y 2 del radical.

Finalmente Davenport propone una función de correlación cruzada definida por:

$$C^2(n, A) = \frac{1}{(1+\alpha)^2} \left[ \frac{1}{1 + \frac{8}{3} \frac{H}{\bar{V}_H} n} \right] \left[ \frac{1}{1 + 10 \frac{B}{\bar{V}_H} n} \right] \quad (5.4.4.24)$$

#### 5.4.5 Resumen de las consideraciones del método estadístico.

Los principios básicos del método estadístico se resumen en seis puntos que son:

- 1) El método se refiere a la respuesta dinámica para un grado de libertad, el cual puede ser extendido a varios grados de libertad, sólo si los modos de vibración superiores al primero no son importantes en la respuesta estructural.
- 2) La velocidad del viento, presión, fuerza externa y respuesta inducida, son conformadas en dos componentes: una con un

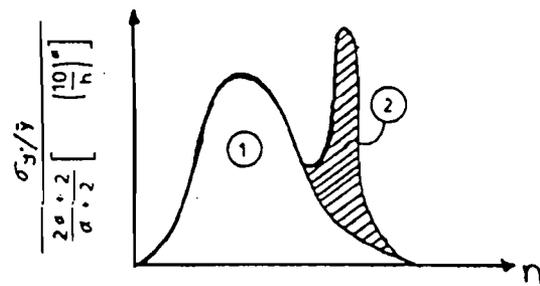


Fig. 5.4.4.1

valor medio invariante en el tiempo y una segunda variante en el tiempo, la que se toma como un proceso aleatorio estacionario con distribución normal, lo que reduce al problema en un diseño estático.

- 3) La presión dinámica del viento se considera como una función lineal de la componente variante en el tiempo de la velocidad.
- 4) El coeficiente de empuje  $C_D$  se considera constante sobre el área expuesta de la estructura, siendo despreciada la fricción del viento con la estructura.
- 5) El área de la estructura proyectada en un plano normal a la dirección de la velocidad media del viento, es tomada como una área rectangular, ver fig.(4.1.1).
- 6) La velocidad media es definida probabilísticamente en base a un periodo medio de retorno, como se muestra en la sección (2.2).

## 6. - EFECTO DEL CAMBIO DE DIRECCION POR ACCION TURBULENTA.

Estudios realizados sobre el tema (ref.8), han demostrado que el cambio de dirección de las ráfagas de viento, a una altura fija sobre el terreno, es un efecto que no puede ser ignorado en el diseño de estructuras. Tales estudios han sido realizados en registros de viento de una torre de medición, dando como resultado figuras como la (2.3.2) y la fig.(6.1), que muestran precisamente el cambio de dirección del viento. En ambas se ve que su envolvente es una elipse.

En el reglamento de Australia se considera el efecto del cambio de dirección del viento a través de la combinación de las repuestas longitudinal y transversal de la estructura. Las cuales, de acuerdo a estudios hechos por Melbourne, presentan para estructuras simétricas, distribuciones normales de probabilidad, y son estadísticamente independientes (ref.1). Así, dicho reglamento propone la siguiente expresión para combinar ambas respuestas:

$$\hat{M}_R = \sqrt{\frac{\bar{M}_a^2 + \hat{M}_c - (G - 1)^2 \bar{M}_a^2}{1 - \frac{(G - 1)^2 \bar{M}_a^2}{\hat{M}_c^2}}} \quad (6.1)$$

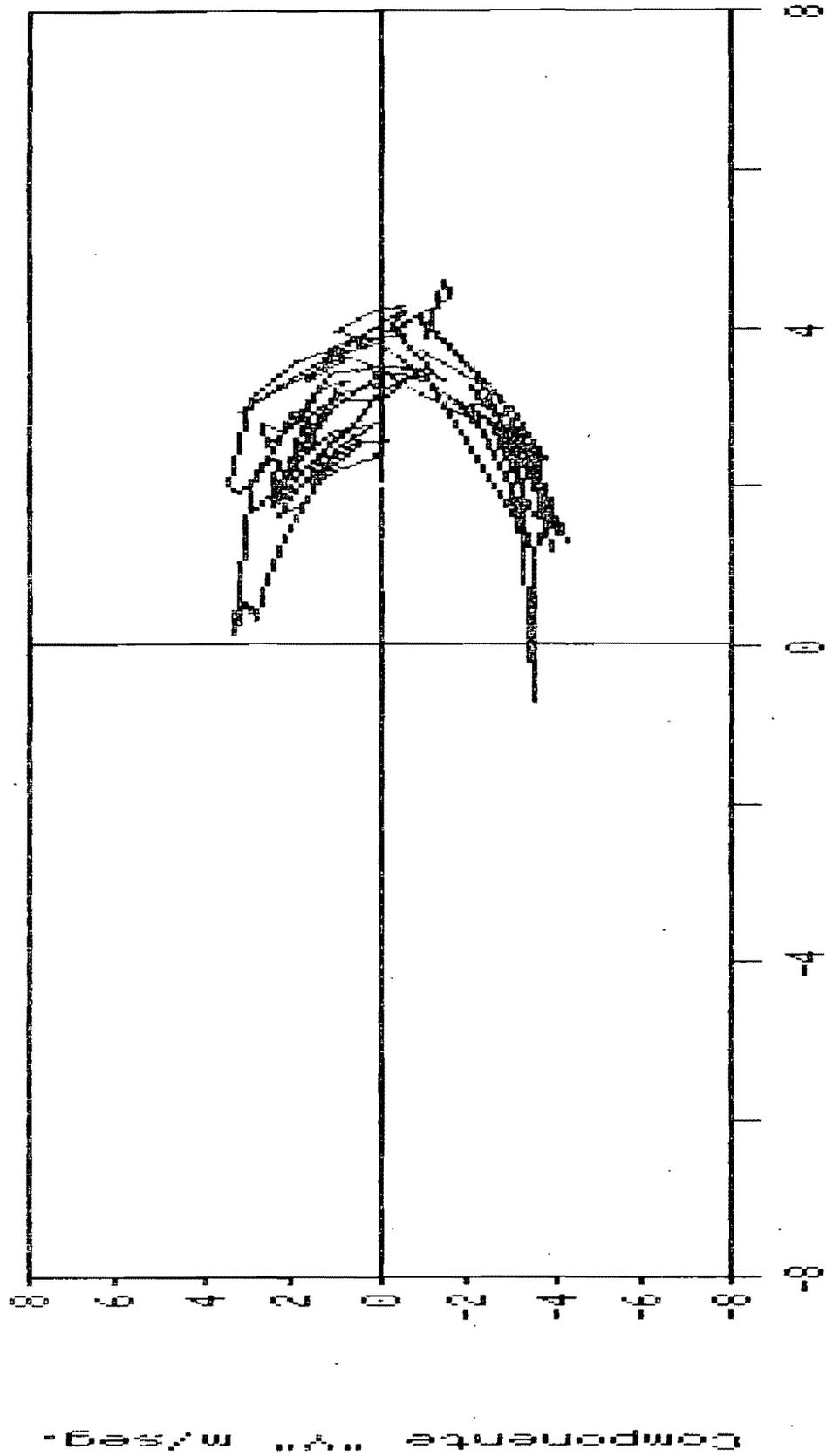
cuando:  $\bar{M}_c = 0$  y  $\hat{M}_c > (G - 1)\bar{M}_a$ ,

y donde:

- $\hat{M}_R$  momento resultante
- $\bar{M}_a$  momento medio longitudinal
- $\hat{M}_a$  momento amplificado longitudinal  
=  $G \bar{M}_a$
- $\bar{M}_c$  momento medio transversal
- $\hat{M}_c$  momento amplificado transversal
- $G$  factor de amplificación



GRAFICA DE LA VELOCIDAD  
A UNA ALTURA DE 3m.



Componente "X" m/seg.

Fig. 6.1

Los momentos antes mencionados son aplicados en la base de la estructura analizada. Además la probabilidad de que ocurran los momentos  $\hat{M}_a$  y  $\hat{M}_c$ , simultáneamente en la estructura, durante una hora de medición de la velocidad media horaria de diseño del viento, de acuerdo al mismo reglamento, es muy pequeña comparada con la probabilidad de que ocurran separadamente.

La ecuación (6.1), según el reglamento de Australia, es una buena aproximación para la combinación de las respuestas, cuando las condiciones mencionadas en el párrafo anterior son aplicables, y cuando las frecuencias fundamentales longitudinal y transversal de la estructura son aproximadamente iguales.

La fig.(6.2) muestra el vector resultante de la combinación de respuestas, cuando el momento medio transversal  $\bar{M}_c$ , es diferente de cero, y en la que se ve que la envolvente del vector resultante es una elipse.

La fig.(6.3) muestra el vector resultante, cuando  $\bar{M}_c$  es igual a cero y  $\hat{M}_c > (G - 1)\bar{M}_a$ , la envolvente sigue siendo una elipse, y donde  $\tan(\alpha_{\max})$  está definida por:

$$\tan(\alpha_{\max}) = \frac{1}{\bar{M}_a} \sqrt{(G - 1)^2 \frac{\bar{M}_a^2}{\hat{M}_c^2} \left[ \frac{(G - 1)^2 \frac{\bar{M}_a^2}{\hat{M}_c^2} - \frac{\bar{M}_a^2}{\hat{M}_c^2} - 2 \right] + \hat{M}_c^2} \quad (6.2)$$

cuando:

$$\bar{M}_c = 0 \quad \text{y} \quad \hat{M}_c > (G - 1)\bar{M}_a$$

Por último la fig.(6.4) presenta el vector resultante, cuando  $\bar{M}_c$  es igual a cero y  $\hat{M}_c \leq (G - 1)\bar{M}_a$ .

Al analizar la ecuación (6.1) se ve que presenta restricciones, lo cual hace que su aplicación sea limitada.

NOTA:  $\bar{M}_a$ ,  $\hat{M}_a$ , y  $\hat{M}_c$ , si se desea, pueden ser obtenidos de la ref.1.

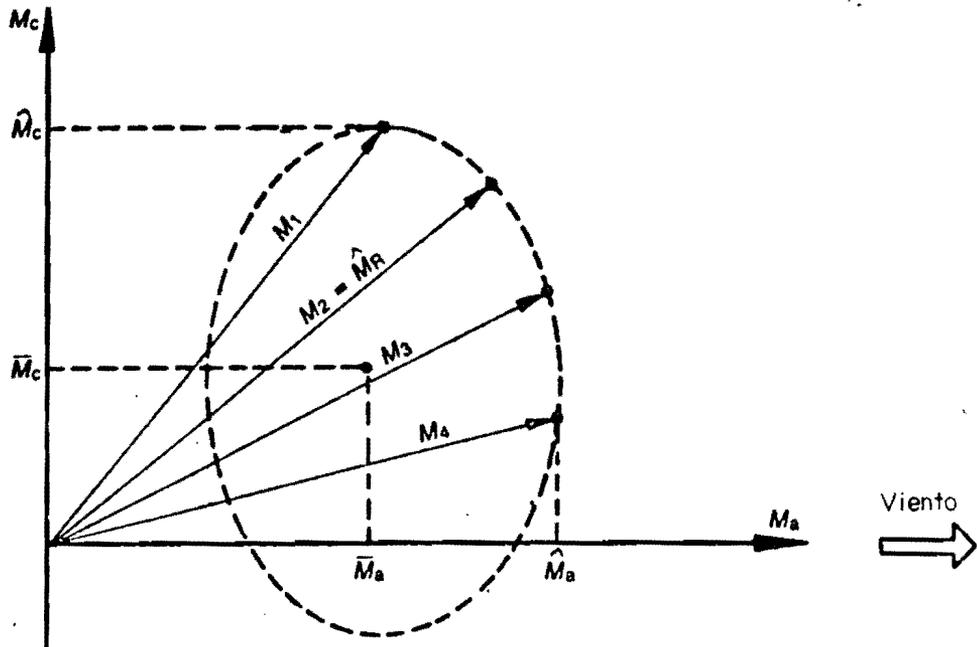


Fig. 6.2

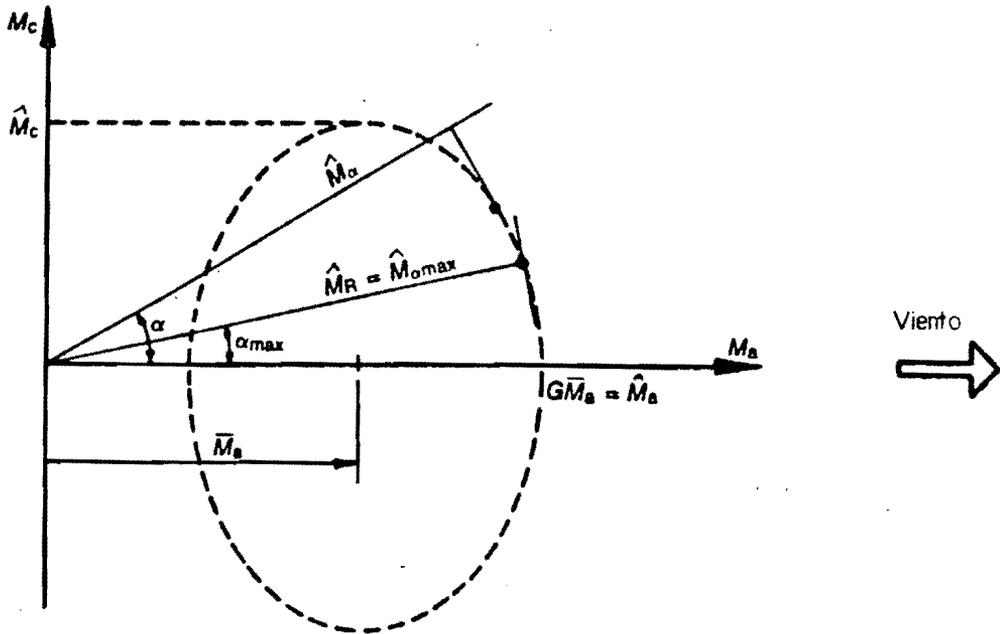


Fig. 6.3

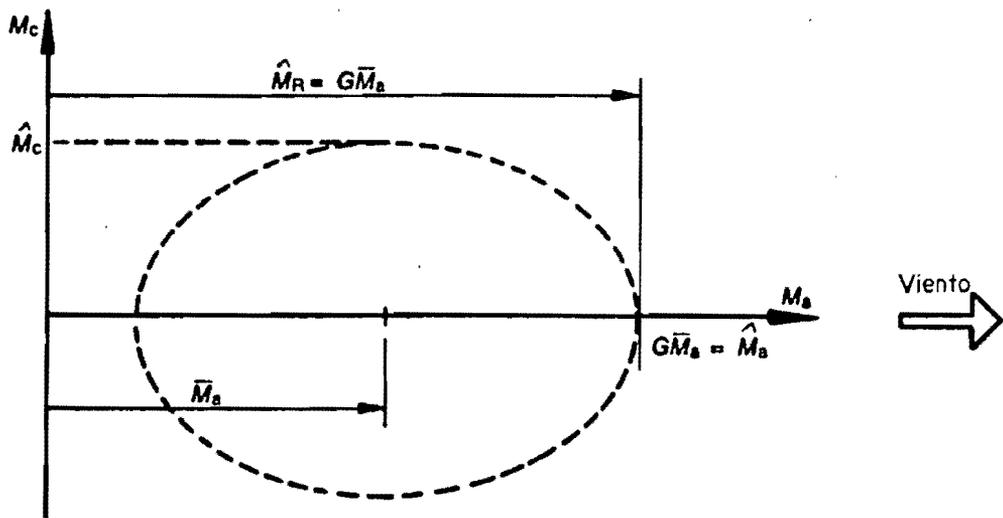


Fig. 6.4

## 7.- ESTUDIO COMPARATIVO DE PROCEDIMIENTOS PARA VALUAR LA ACCION TURBULENTO DEL VIENTO EN EDIFICIOS.

### 7.1 INTRODUCCION.

Dentro de este tema se comparará lo propuesto en los reglamentos de Canadá y Australia, los cuales proponen expresiones diferentes para valuar la acción turbulenta del viento. No se comparará el método propuesto por el método determinista debido a que es un procedimiento complejo, que se aconseja usar cuando sea necesario hacer un estudio detallado del comportamiento de las estructuras bajo acción turbulenta del viento.

### 7.2 FACTOR DE AMPLIFICACION DINAMICO O FACTOR RAFAGA PROPUESTO POR EL REGLAMENTO DE CANADA EN 1980. (Referencia 2).

Este reglamento propone la expresión siguiente para el factor de amplificación dinámico:

$$C_g = 1 + g_p \left( \frac{\sigma}{\mu} \right) \quad (7.2.1)$$

donde:

$C_g$  factor de amplificación dinámico o factor ráfaga

$g_p$  factor de pico

$\left( \frac{\sigma}{\mu} \right)$  es el coeficiente de variación del efecto de la carga del viento

$\sigma$  desviación estandar del efecto de la carga del viento

$\mu$  valor medio del efecto de la carga del viento

El coeficiente de variación se define como:

$$\left( \frac{\sigma}{\mu} \right) = \sqrt{\frac{K}{C_e} \left[ J + \frac{sF}{\beta_0} \right]} \quad (7.2.2)$$

donde:

K factor relacionado con el coeficiente de rugosidad de la superficie del terreno:

= 0.08 para área de exposición A: terreno abierto con escasos edificios, árboles u otras obstrucciones, además de áreas abiertas de agua o mar

= 0.10 para área de exposición B: áreas urbanas y suburbanas, terreno arbolado, así como centros de pequeñas ciudades

= 0.14 para área de exposición C: centro de grandes ciudades con alta concentración de edificios altos, considerando a esta zona como aquella en la que mínimo el 50% de los edificios son de cuatro niveles o más

Ce factor de exposición, cuyo cálculo está basado en perfiles de velocidad media, los que varían considerablemente dependiendo de la rugosidad del terreno, localizado en el frente de ataque del viento. Este factor ha sido definido en la sección(4.2) o bien en la fig.(7.2.1). En ambos casos Z es la altura en m. sobre el terreno, que se tomará, en este caso, igual a H, que es la altura de un edificio de ancho B en la dirección perpendicular al viento

J factor de turbulencia de fondo, definido en la fig.(7.2.2)

s factor de reducción de tamaño, definido en la fig.(7.2.3), donde:

$n_0$  es la frecuencia natural de vibración del edificio en Hertz

$V_H$  = velocidad media horaria del viento evaluada en la parte más elevada de la estructura

$$= \bar{V} \sqrt{C_e}$$

Donde  $\bar{V}$  es la velocidad media básica del viento, determinada por un análisis de valores extremos de los registros metereológicos de velocidades medias horarias. El valor de  $C_e$  deberá ser evaluado para  $Z=H$

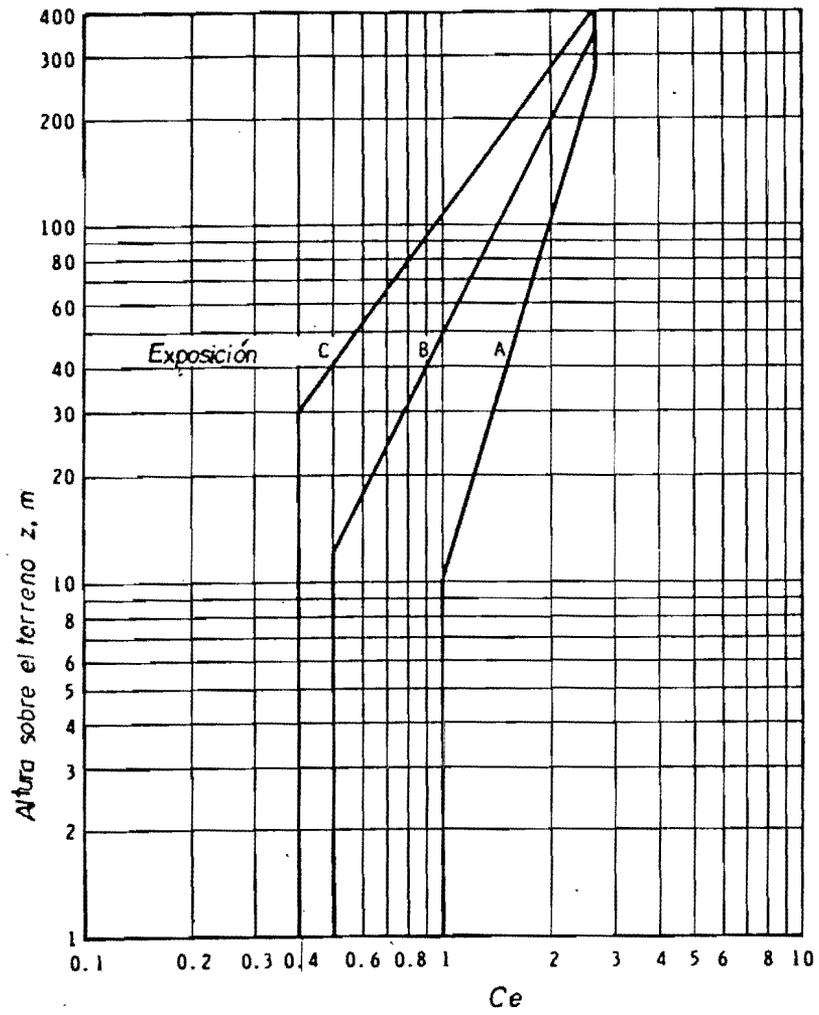


Fig. 7.2.1

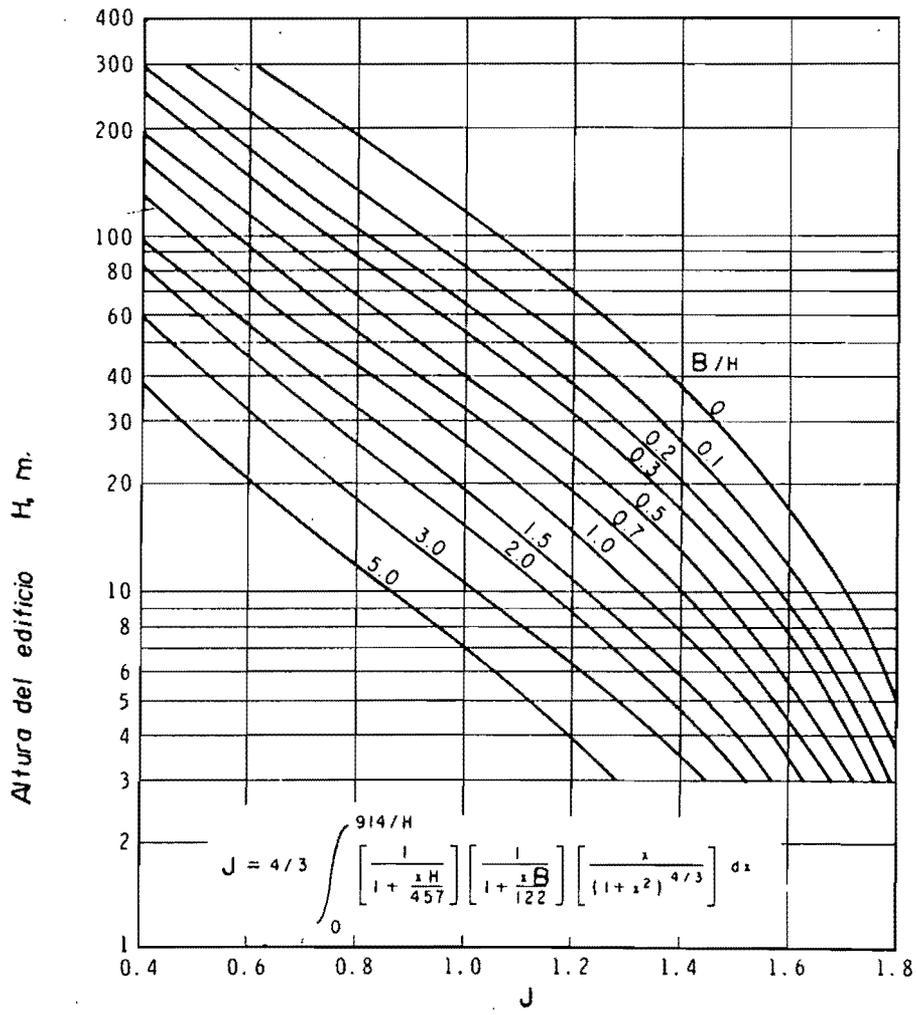


Fig 7.2.2

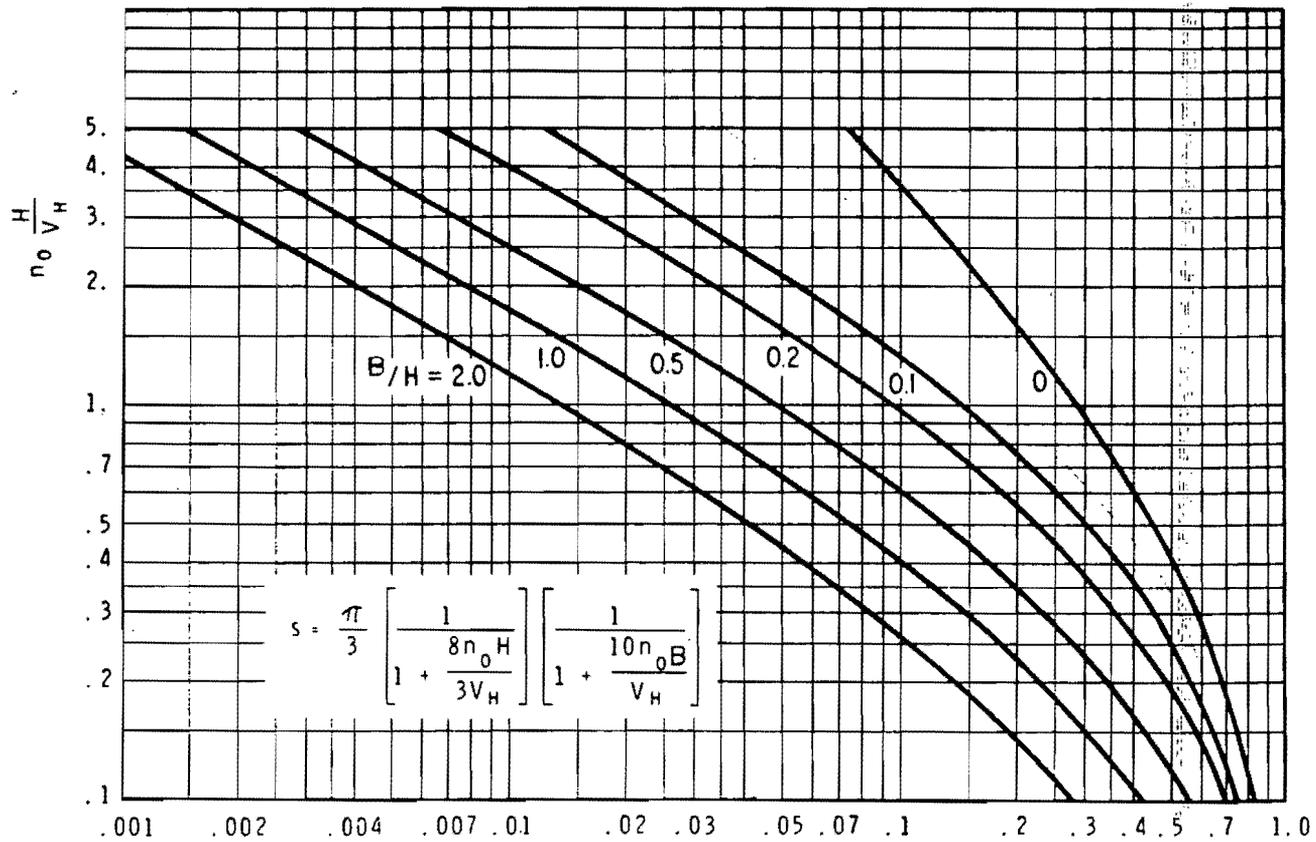


Fig. 7.2.3

F es la relación de energía de ráfaga, definida en la fig.(7.2.4)

$\beta_0$  relación de amortiguamiento crítico; se sugiere 0.01 para edificios a base de marcos de acero y 0.02 para marcos de concreto

El factor de pico, que es el número de desviaciones estándar que el efecto pico supera al medio, se define en la fig.(7.2.5), tomando:

$$\nu = n_0 \sqrt{\frac{sF}{sF + \beta_0 J}} \quad (7.2.3)$$

Si se compara la ecuación que define al factor de amplificación dinámico  $C_g$ , propuesta por el reglamento de Canadá, con la descrita en la sección (5.4) se ve que es prácticamente la misma. Ello se debe a que el desarrollo mostrado en la sección antes mencionada es la base teórica que define al factor ráfaga  $C_g$ .

### 7.3 FACTOR DE AMPLIFICACION DINAMICO O FACTOR RAFAGA PROPUESTO POR EL REGLAMENTO DE AUSTRALIA DE 1989. (Referencia 1).

Este reglamento propone la expresión siguiente para definir el factor de amplificación dinámico,  $G$ :

$$G = 1 + r \sqrt{\left[ g_v^2 J (1+w)^2 + \frac{g_f^2 S E}{\beta_0} \right]} \quad (7.3.1)$$

donde:

$$r = 2 \frac{\left[ \sigma_v / \bar{v} \right]}{F_t}$$

es el factor de rugosidad evaluado en la altura  $H$ , siendo:

$H$  es la altura del edificio en m.

$\left[ \sigma_v / \bar{v} \right]$  el índice de turbulencia calculado de acuerdo a la sección (7.3.2)

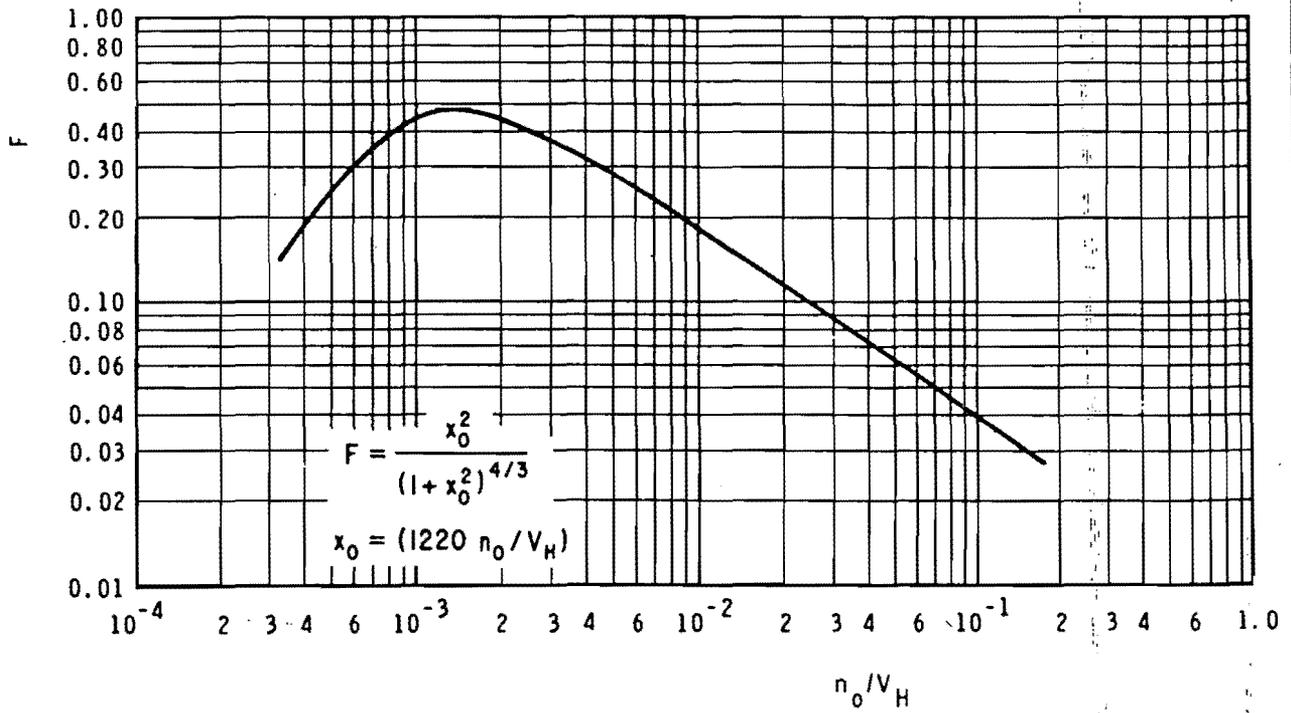


Fig. 7.2.4

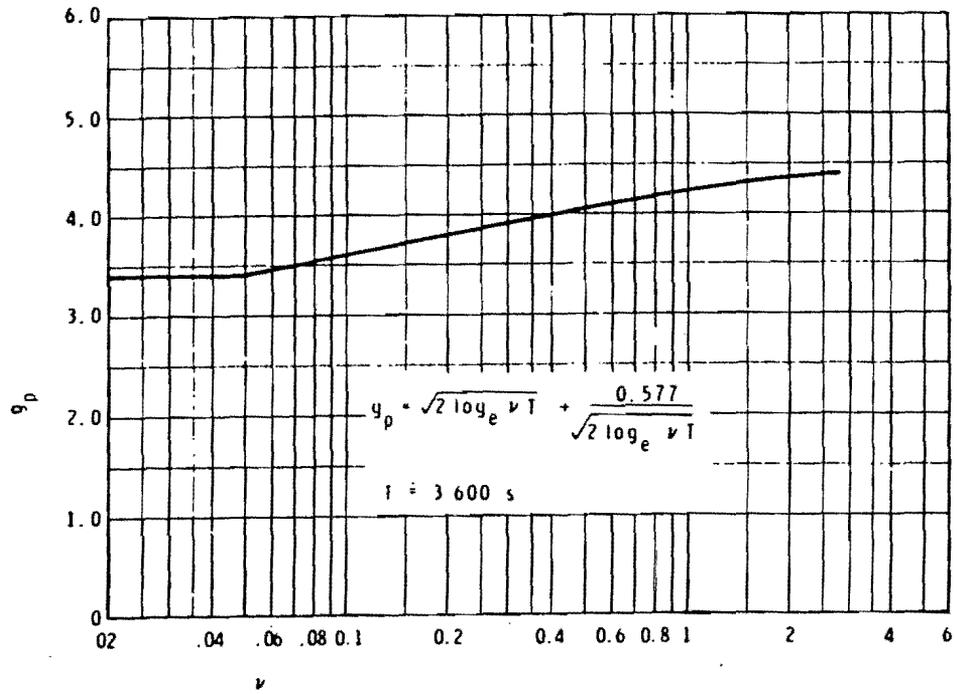


Fig. 7.2.5

$F_t$  es el multiplicador topográfico calculado de acuerdo a la sección (7.3.3)

$g_v$  factor de pico para la fluctuación de la velocidad:  
= 3.7

J factor de fondo, el cual es una medida de la componente de fondo de la fluctuación de la respuesta causada por las frecuencias bajas de la variación de la velocidad del viento, definido como:

$$J = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{36 H^2 + 64 B^2}}{L_H}} \quad (7.3.2)$$

en la que :

B es el ancho horizontal de la estructura vertical, normal a la dirección de ataque del viento, en m.

$L_H$  es una medida de la escala de longitud de turbulencia efectiva, en m.

$$= 1000 \left( \frac{H}{10} \right)^{0.25}$$

w factor en función de los efectos de segundo orden del índice de turbulencia:

$$= \frac{g_v r \sqrt{J}}{4} \quad (7.3.3)$$

$g_f$  factor de pico, definido como la relación del valor pico esperado, el que ocurre una vez por hora, y la desviación estandar de la parte resonante de la respuesta:

$$= \sqrt{2 \ln (3600 n_a)} \quad (7.3.4)$$

en la que:

$n_a$  es la frecuencia del primer modo de vibración del edificio, en Hertz, en la dirección longitudinal de análisis

S factor de tamaño, de acuerdo a la distribución de presiones del edificio:

$$= \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{3.5 n_a H}{\bar{V}_H} \right) \right] \left[ 1 + \left( \frac{4 n_a B}{\bar{V}_H} \right) \right]} \quad (7.3.5)$$

en la que :

$\bar{V}_H$  es la velocidad de diseño media horaria medida a la altura H, definida en la sección (7.3.4)

E densidad espectral de  $n_a$ :

$$= \frac{0.47 N}{(2+N^2)^{5/6}}$$

donde:

$$N = \frac{n_a L_H}{\bar{V}_H}$$

$\beta_0$  es la capacidad de amortiguamiento de la estructura, como una relación de amortiguamiento crítico, obtenido de la sección (7.3.5)

La ecuación (7.3.1) propuesta para el cálculo del factor de amplificación dinámico o ráfaga, en el reglamento de Australia, (ref.1), presenta un término relacionado con los efectos de segundo orden de la intensidad ó índice de turbulencia, efecto que probablemente es importante en la acción turbulenta del viento, y que por primera vez aparece en un reglamento, pero que la no justificación de este factor y en general del factor G, hacen que la ecuación (7.3.1) sea válida sólo dentro de Australia. Su aplicación en nuestro país, es debatible ya que no es posible aplicar algo que no esta debidamente demostrado. (ver comentario F4.4.1 de la referencia 1).

### 7.3.1 Definición de regiones y categorías de terreno.

El reglamento de Australia propone las siguientes regiones:

Región A (normal) región donde la acción del viento es casi nula, por ejemplo ciudades no costeras como el Distrito Federal.

Región B (intermedia) Región costera en la que la acción del viento es importante pero sin llegar a la categoría de ciclón.

Región C (ciclones tropicales) Región costera en la que existen ciclones.

Región D (ciclones tropicales severos) Región costera en que la acción de los ciclones es seria.

Estas regiones se muestran en la fig.(7.3.1.1).

De forma similar el reglamento clasifica al tipo de terreno en cuatro categorías que son:

Categoría 1 : Terreno abierto con pocos o sin obstáculos.

Categoría 2 : Areas abiertas o praderas con obstáculos escasos, cuya altura va de 1.5 a 10 m.

Categoría 3 : Terreno con numerosos obstáculos, poco espaciados de 3 a 5 m de altura; del tipo de casas domésticas.

Categoría 4 : Terreno con grandes y numerosos obstáculos, como centro de grandes ciudades o ciudades industriales complejas.

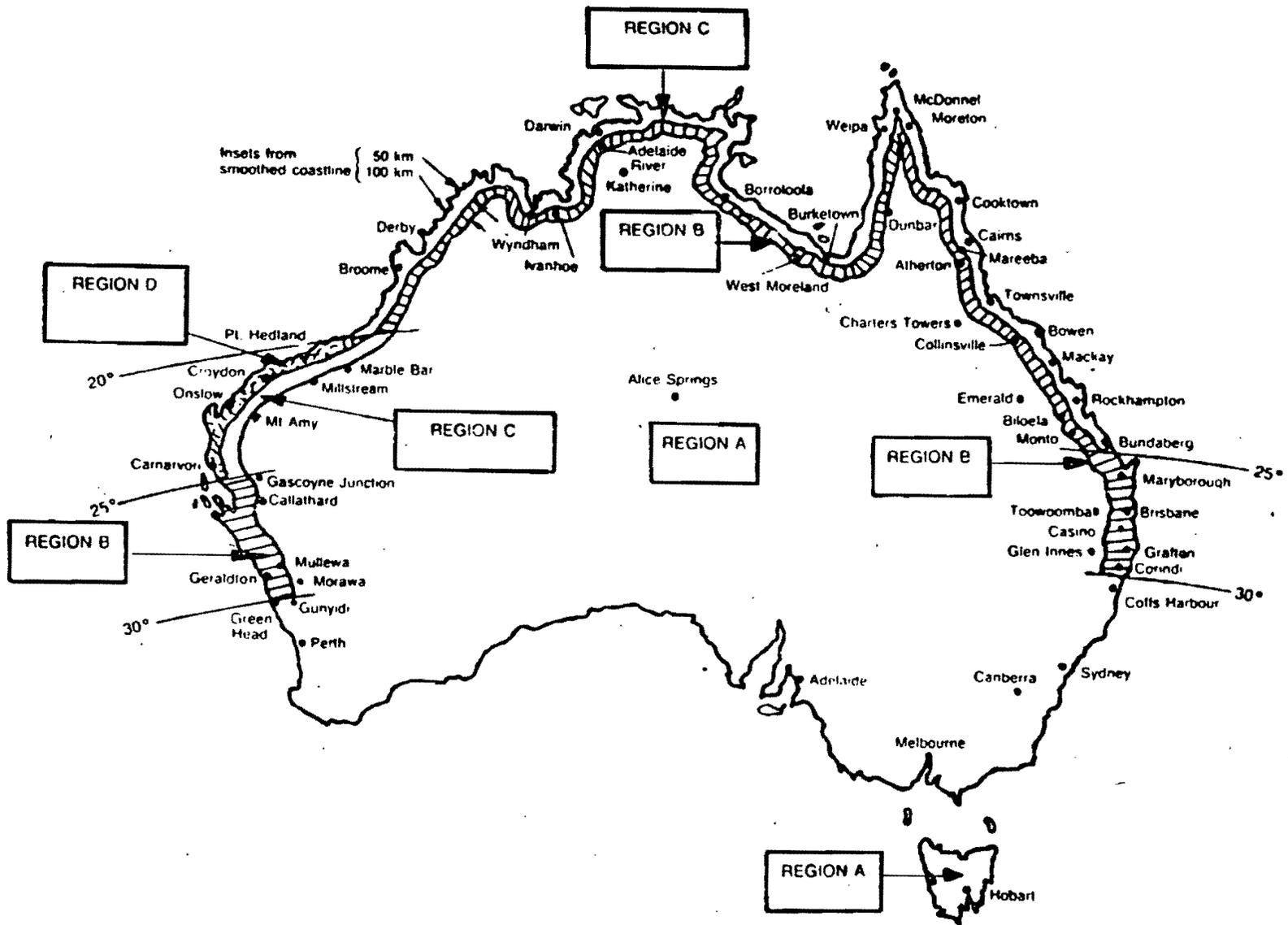


Fig. 7.3.1.1 Regiones topográficas.

Las categorías se muestran en las figs. (7.3.1.2) y (7.3.1.3).

### 7.3.2 Valores del índice de turbulencia.

Los valores del índice de turbulencia son especificados en la tabla (7.3.2.1), los que son válidos en los casos siguientes:

- a) Diseño por esfuerzos permisibles y resistencia última, para regiones A y B solamente.
- b) Diseño por estados límite de servicio para todas las regiones.

Notas:

- 1.- Para valores intermedios de la altura y categoría de terreno, es válido interpolar.
- 2.- Para diseño por esfuerzos permisibles y resistencia última y categoría de terreno 1, 2, y 3 en regiones C y D, usar índices de turbulencia para terreno categoría 3 correspondientes a regiones A y B. Para categoría de terreno 4 en regiones C y D usar valores del índice de turbulencia para terreno categoría 4 correspondiente a regiones A y B.

### 7.3.3 Cálculo del multiplicador topográfico $F_t$ .

(Ver comentario F4.2.8 de la referencia 1).

El multiplicador topográfico se aplica a estructuras construidas sobre accidentes topográficos locales, que forman parte de las zonas topográficas mencionadas en (7.3.1), por lo que fuera de los límites de dichos accidentes topográficos ó si  $\phi$  es menor que 0.05, el valor de  $F_t$  se tomará igual a 1. Los límites antes mencionados y la ecuación que define a  $\phi$ , se describen a continuación.

Los accidentes topográficos y sus límites se ven en la



Categoría 2



Categoría 3

Fig. 7.3.1.2 Categorías de terreno.

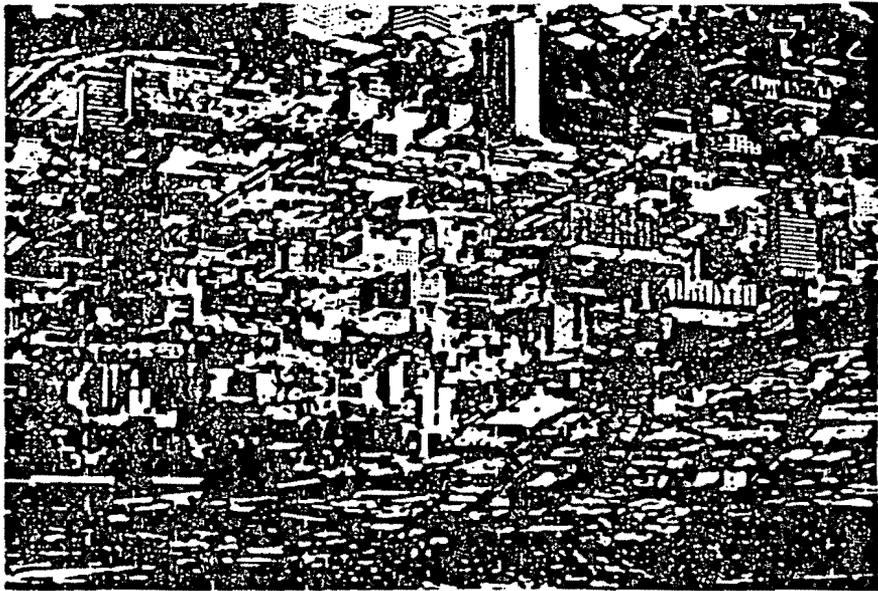


Fig. 7.3.1.3 Terreno categoría 4.

Valores de $\sigma_v/\bar{v}$				
Altura (z) m.	TERRENO CATEGORIA			
	1	2	3	4
<3	0.171	0.207	—	—
5	0.165	0.196	0.271	—
10	0.157	0.183	0.239	—
15	0.152	0.176	0.225	—
20	0.147	0.171	0.215	0.342
30	0.140	0.162	0.203	0.305
40	0.133	0.156	0.195	0.285
50	0.128	0.151	0.188	0.270
75	0.118	0.140	0.176	0.248
100	0.108	0.131	0.166	0.233
150	0.095	0.117	0.150	0.210
200	0.085	0.107	0.139	0.196
250	0.080	0.098	0.129	0.183
300	0.074	0.092	0.121	0.173
400	0.068	0.082	0.108	0.155
500	0.058	0.074	0.098	0.141

Tabla 7.3.2.1

fig.(7.3.3.1). De acuerdo con las variables que aparecen en tal figura se propone la siguiente expresión para calcular  $F_t$  :

$$F_t = 1 + (k_t f \phi') \quad (7.3.3.1)$$

donde:

$$K_t = 1.4 \quad \text{para escarpes}$$

$$= 1.4 + 36 (\phi_d - 0.05) \quad \text{con un máximo de 3.2 para colinas y cerros}$$

$$f = \left[ 1 - \frac{|X|}{1.5 L^*} \right] \left[ 1 - \frac{Z}{Lu} \right] \quad \text{para } \phi \leq 0.3$$

$$= \left[ 1 - \frac{|X|}{1.5 L^*} \right] \left[ 1 - \frac{0.6 Z}{H'} \right] \quad \text{para } \phi > 0.3$$

para valores negativos de X :  $L^* = Lu$   
 $L^* = 1.67 H'$  para  $\phi > 0.3$

para valores positivos de X :  $L^* = Lu$  ó  $1.67 H'$  , el que resulte mayor. Para colinas y cerros  
 $L^* = 2Lu$  ó  $0.333H'$  , el que resulte mayor. Para escarpes

$$\phi = H' / 2Lu$$

$\phi_d$  promedio de la pendiente del terreno visto abajo de la colina, cerro o escarpe, en una distancia de  $5H'$

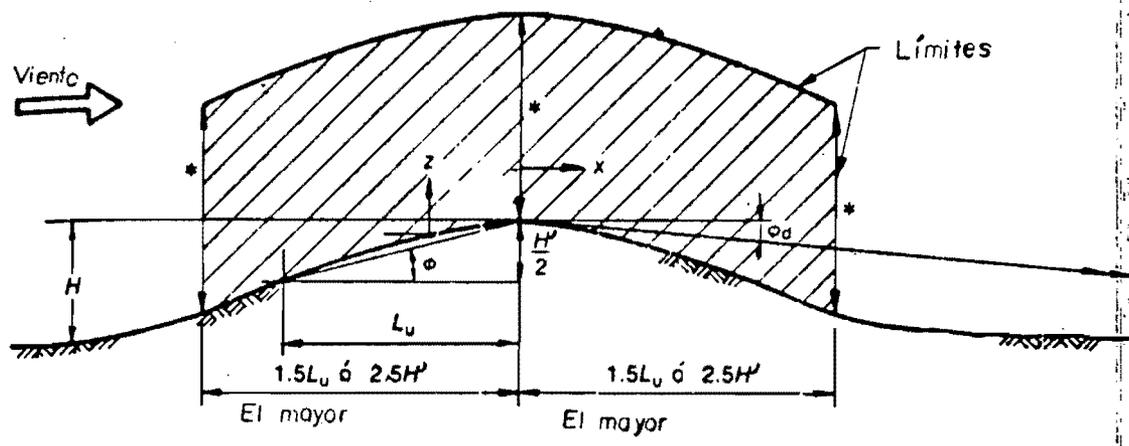
$\phi'$  es el menor valor de  $\phi$  ó 0.3

X ordenada horizontal, colocando el origen en la cresta del cerro, colina o escarpe, al eje vertical del edificio en m.

Z altura local sobre el nivel del terreno, de la parte total o parcial del edificio dentro de los límites del accidente topográfico, en m.

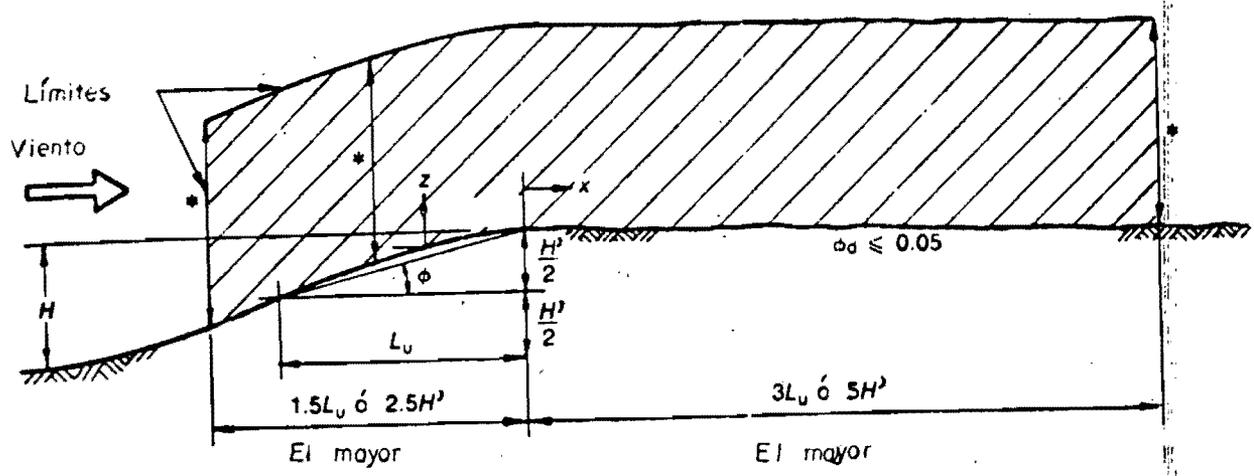
$H'$  altura de la colina, cerro o escarpe en m.

$Lu$  distancia horizontal en m., de la cresta al punto



\*  $L_u \text{ ó } 1.67H^2$  El mayor

Cerros y colinas.



\*  $L_u \text{ ó } 1.67H^2$  El mayor

Escarpes.

Fig. 7.3.3.1 Accidentes topográficos.

medio entre ésta y el nivel más bajo de la colina, cerro o escarpe, (ver fig.7.3.3.1)

#### 7.3.4 Velocidad media horaria $\bar{V}_z$ .

(Ver comentario F4.2 de la referencia 1).

La velocidad media de diseño horaria debe ser determinada mediante la ecuación:

$$\bar{V}_z = V \bar{M}_{(z,cat)} F_s F_t F_i \quad (7.3.4.1)$$

donde:

- $\bar{V}_z$  velocidad de diseño media horaria en m/seg.
- $V$  velocidad básica del viento definida en la tabla (7.3.4.2.1), de la sección(7.3.4.2) en la que:  
 $V_u$  es para diseño por resistencia última  
 $V_p$  es para diseño por esfuerzos permisibles  
 $V_s$  es para diseño por estados límite de servicio
- $\bar{M}_{(z,cat)}$  es un multiplicador de la velocidad media horaria que tiene que ver con la categoría de terreno y cuyos valores se obtienen de las tablas (7.3.4.2.2) y (7.3.4.2.3) de la sección(7.3.4.2). (Ver comentario E3.2.5 de la referencia 1)
- $F_t$  multiplicador topográfico definido en la sección (7.3.3)
- $F_s$  multiplicador de protección definido en la sección (7.3.4.1)
- $F_i$  multiplicador de importancia de la estructura, que se obtiene de la tabla (7.3.4.2.4) de la sección (7.3.4.2).  
(Ver comentario E3.2.9 de la referencia 1)

##### 7.3.4.1 Definición del multiplicador de protección $F_s$ .

(Ver comentario E3.2.7 de la referencia 1).

La aplicación de  $F_s$  es permitida si se satisfacen las siguientes condiciones:

- a) La altura de los edificios viento arriba y dentro de un sector de  $45^\circ$  y radio  $20h_t$  es menor ó igual a  $h_t$  (Ver figura(7.3.4.1.1)).
- b) Alternativamente si la altura promedio de los edificios dentro del radio antes mencionado es menor que  $h_t$ , es permitido aplicar el factor sólo dentro del área, del edificio protegido, que sea menor ó igual a la altura promedio de los edificios de protección. Fuera de dicha área  $F_s$  será igual a 1.

El multiplicador de protección está establecido en la tabla (7.3.4.1.1), a través de un parámetro definido por:(la interpolación es permitida)

$$D = \frac{1s}{(hs \ bs)^{1/2}} \quad (7.3.4.1.1)$$

donde:

- D            parámetro de espacio.
- 1s            espacio promedio de protección en m.  
               =  $h_t(10/ns + 5)$ .
- hs            altura promedio de los edificios de protección en m.
- bs            ancho promedio de los edificios de protección en m.
- $h_t$            altura del edificio protegido en m.
- ns            número de edificios dentro del sector y radio antes mencionados con altura  $h \geq h_t$

#### 7.3.4.2 Tablas necesarias para definir la velocidad media de diseño.

La tabla (7.3.4.2.1) define la velocidad media básica del viento.

La tabla (7.3.4.2.2) da valores de  $\bar{M}_{(z,cat)}$  para diseño por resistencia última y esfuerzos permisibles en regiones A y B, y para diseño por estados límite de servicio en todas las regiones. La tabla (7.3.4.2.3) da valores de  $\bar{M}_{(z,cat)}$  para diseño por resistencia última y esfuerzos permisibles en las regiones C y D.

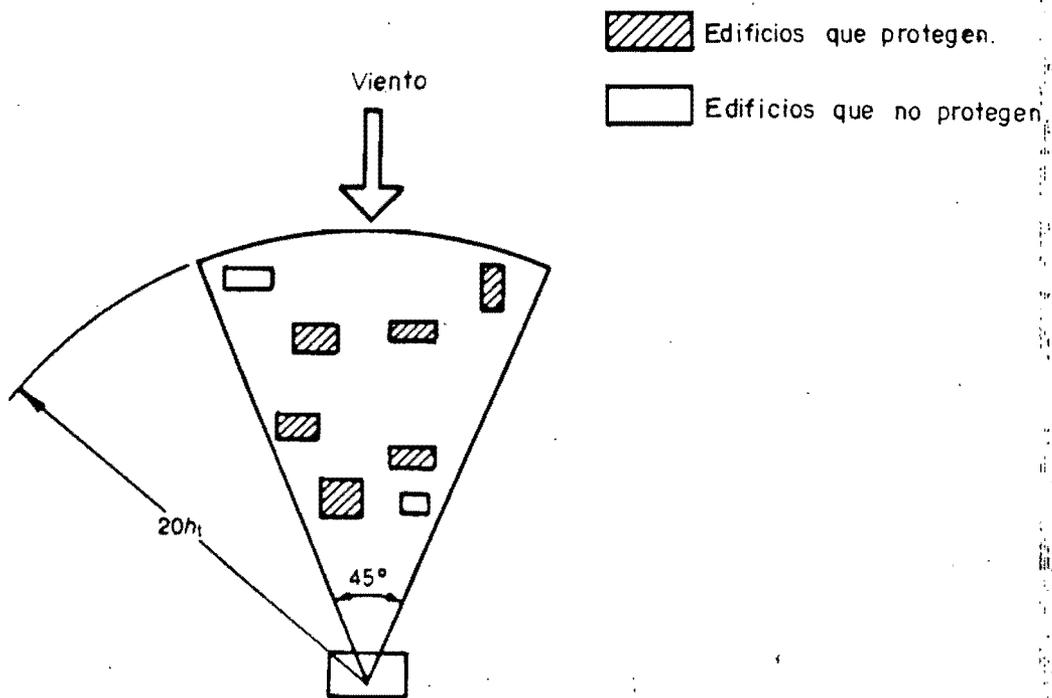


Fig. 7.3.4.1.1 Proteccion de edificios.

Parámetro D	Valores de $F_s$
≤ 1.5	0.7
3.0	0.8
6.0	0.9
> 12.0	1.0

Tabla 7.3.4.1.1

Región	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	$V_u$ (m/s)
A	38	41	50
B	38	49	60
C	45	57	70
D	50	69	85

Tabla 7.3.4.2.1

Altura (z) m.	Valor de $\bar{M}(z, cat)$			
	TERRENO		CATEGORIA	
	1	2	3	4
<3	0.61	0.48	0.38	0.35
5	0.65	0.53	0.38	0.35
10	0.71	0.60	0.44	0.35
15	0.74	0.64	0.49	0.35
20	0.77	0.66	0.52	0.35
30	0.80	0.70	0.57	0.38
40	0.83	0.74	0.60	0.40
50	0.85	0.76	0.63	0.42
75	0.89	0.81	0.68	0.51
100	0.92	0.84	0.72	0.55
150	0.97	0.89	0.78	0.62
200	1.00	0.93	0.82	0.67
250	1.03	0.96	0.86	0.71
300	1.06	0.99	0.89	0.74
400	1.10	1.04	0.94	0.81
500	1.14	1.08	0.99	0.86

Tabla 7.3.4.2.2

Altura (z) m.	Valor de $M_{(z,cat)}$					
	TERRENO CATEGORIA					
	1	2	3	4	5	6
≤ 3		0.50			0.40	
5		0.54			0.40	
10		0.60			0.47	
15		0.64			0.54	
20		0.68			0.59	
30		0.75			0.67	
40		0.80			0.74	
50		0.84			0.80	
75		0.93			0.91	
≥ 100		1.00			1.00	

Tabla 7.3.4.2.3

En estas tablas, para valores intermedios de la altura y categoría de terreno la interpolación se permite.

Finalmente en la tabla (7.3.4.2.4) se muestran los valores de  $F_i$ .

CLASIFICACION DE LA ESTRUCTURA	VALOR DE $F_i$
Estructuras que deben permanecer sin daño después de desastres.	1.1
Estructuras normales.	1.0
Estructuras que representen bajo riesgo para la pérdida de vidas humanas u otras propiedades en caso de falla.	0.9
Estructuras temporales cuyo uso sea menor de 6 meses.	0.8

Tabla (7.3.4.2.4)

7.3.5 Valores de  $\beta_0$  para definir el factor ráfaga.

Los valores de  $\beta_0$  son dados en la tabla (7.3.5.1):

NIVEL DE ESFUERZO	VALOR DE $\beta_0$
Estado límite de esfuerzos:	
marcos de acero:	0.005 a 0.010
concreto reforzado y presforzado:	0.005 a 0.010
Resistencia última y esfuerzos permisibles :	
marcos de acero soldados:	0.02
marcos de acero remachados:	0.05
marcos de concreto reforzado:	0.05

Tabla (7.3.5.1)

#### 7.4 COMPARACION DE LOS FACTORES DE AMPLIFICACION DINAMICOS DE LOS REGLAMENTOS DE CANADA Y AUSTRALIA.

Al comparar los factores de amplificación  $C_g$  de Canadá y  $G$  de Australia, vemos que sus expresiones son diferentes, sin embargo los términos que aparecen en ambas son similares, con excepción del término  $w$  que aparece en el factor  $G$ , relacionado con los efectos de segundo orden del índice de turbulencia, del que no se comenta nada en el reglamento de Australia, y por tanto no se sabe a que se refieran tales efectos.

Para tener una idea numérica de los factores  $C_g$  y  $G$ , en seguida se presentan algunos ejemplos:

##### EJEMPLO 1:

Datos para  $C_g$ :

$$H = 122\text{m.}$$

$$B = 30\text{m.}$$

$$n_o = 0.250 \text{ Hz.}$$

$$\beta_o = 0.015$$

$$V_H = 31.7\text{m/seg.}$$

Area de exposición A

Evaluación de  $C_g$ :

$$K = 0.08$$

$$C_e = 2.01$$

$$J = 0.713$$

$$s = 0.087$$

$$F = 0.218$$

$$v = 0.199$$

$$g_p = 3.786$$

$$\sigma/\mu = 0.281$$

$$\underline{\underline{C_g = 2.062}}$$

Datos para  $G$ :

$$H = 122\text{m.}$$

$$B = 30\text{m.}$$

$$n_a = 0.250 \text{ Hz.}$$

$$\beta_o = 0.015$$

$$V_H = 31.7\text{m/seg.}$$

Terreno categoría 1

Evaluación de  $G$ :

$$\sigma_v/V = 0.102$$

$$F_t = 1.000$$

$$r = 0.204$$

$$g_v = 3.700$$

$$L_H = 1868.916\text{m.}$$

$$J = 0.708$$

$$w = 0.159$$

$$g_f = 3.688$$

$$E = 0.078$$

$$\underline{\underline{G = 2.039}}$$

Para  $w=0$   
 $G=1.971$   
3.36% menor

EJEMPLO 2:

Datos para  $C_g$ :

$H=152m.$

$B=53m.$

$n_o=0.200 Hz.$

$\beta_o=0.010$

$V_H=32.9m/seg.$

Area de exposición A

Evaluación de  $C_g$ :

$K=0.08$

$C_e=2.14$

$J=0.568$

$s=0.0.72$

$F=0.257$

$v=0.175$

$g_p=3.751$

$\sigma/\mu=0.301$

$C_g=2.127$

Datos para  $G$ :

$H=152m.$

$B=53m.$

$n_a=0.200 Hz.$

$\beta_o=0.010$

$V_H=32.9m/seg.$

Terreno categoría 1

Evaluación de  $G$ :

$\sigma_v/V=0.095$

$F_t=1.000$

$r=0.190$

$g_v=3.700$

$L_H=1974.517m.$

$J=0.663$

$w=0.143$

$g_f=3.627$

$S=0.103$

$E=0.089$

$G=1.928$

Para  $w=0$

$G=1.873$

2.85% menor

EJEMPLO 3:

Datos para  $C_g$ :

$H=244m.$

$B=76m.$

Datos para  $G$ :

$H=244m.$

$B=76m.$

$n_o = 0.125$  Hz.  
 $\beta_o = 0.010$   
 $V_H = 35.1$  m/seg.  
Area de exposición A

Evaluación de Cg:

$K = 0.08$   
 $C_e = 2.45$   
 $J = 0.417$   
 $s = 0.085$   
 $F = 0.351$   
 $v = 0.117$   
 $g_p = 3.642$   
 $\sigma/\mu = 0.333$

$C_g = 2.214$

$n_a = 0.125$  Hz.  
 $\beta_o = 0.010$   
 $V_H = 35.1$  m/seg.  
Terreno categoría 1

Evaluación de G:

$\sigma_v/V = 0.081$   
 $F_t = 1.000$   
 $r = 0.161$   
 $g_v = 3.700$   
 $L_H = 2222.529$  m.  
 $J = 0.584$   
 $w = 0.114$   
 $g_f = 3.495$   
 $S = 0.119$   
 $E = 0.115$

$G = 1.831$

Para  $w=0$

$G = 1.800$

1.69% menor

#### EJEMPLO 4:

Datos para Cg:

$H = 183$  m.  
 $B = 30$  m.  
 $n_o = 0.200$  Hz.  
 $\beta_o = 0.015$   
 $V_H = 33.5$  m/seg.  
Area de exposición A

Evaluación de Cg:

$K = 0.08$   
 $C_e = 2.256$   
 $J = 0.619$

Datos para G:

$H = 183$  m.  
 $B = 30$  m.  
 $n_a = 0.200$  Hz.  
 $\beta_o = 0.015$   
 $V_H = 33.5$  m/seg.  
Terreno categoría 1

Evaluación de G:

$\sigma_v/V = 0.088$   
 $F_t = 1.000$   
 $r = 0.177$

s= 0.096  
F= 0.260  
v= 0.171  
 $g_p = 3.745$   
 $\sigma/\mu = 0.284$

Cg=2.085

$g_v = 3.700$   
 $L_H = 2068.296m.$   
J= 0.647  
w= 0.132  
 $g_f = 3.627$   
S= 0.121  
E= 0.087

G=1.802

Para w=0

G=1.753

2.72% menor

#### EJEMPLO 5:

Datos para Cg:

H= 152m.

B= 30m.

$n_o = 0.175$  Hz.

$\beta_o = 0.010$

$V_H = 32.9m/seg.$

Area de exposición A

Evaluación de Cg:

K= 0.08

Ce= 2.142

J= 0.665

s= 0.054

F= 0.279

v= 0.146

$g_p = 3.702$

$\sigma/\mu = 0.285$

Cg= 2.054

Datos para G:

H= 152m.

B= 30m.

$n_a = 0.175$  Hz.

$\beta_o = 0.010$

$V_H = 32.9m/seg.$

Terreno categoría 1

Evaluación de G:

$\sigma_v / V = 0.095$

$F_t = 1.000$

r= 0.190

$g_v = 3.700$

$L_H = 1974.517m.$

J= 0.677

w= 0.145

$g_f = 3.590$

S= 0.159

E= 0.097

G= 2.075

Para  $w=0$   
 $G= 2.026$   
2.36% menor

Al analizar los resultados, se ve que los valores de  $C_g$  y  $G$  en ningún caso son iguales. Sin embargo los valores obtenidos del factor  $G$ , propuesto por el reglamento de Australia, son poco confiables, por las razones ya mencionadas.

Al evaluar el factor  $G$ , para  $w=0$ , se observa que la diferencia es pequeña, por tanto para estos ejemplos, el valor de  $w$  es de poca importancia.

## 8. -PROCEDIMIENTO DE CALCULO PROPUESTO.

### 8.1 INTRODUCCION.

En esta sección se propone un procedimiento para el diseño por viento de edificios, con base en la información expuesta anteriormente, para ello se tomará como base el reglamento de Canadá, ya que es el más congruente con el reglamento de México. Además se harán algunas modificaciones extraídas del reglamento de Australia, y que completan algunos conceptos del reglamento de Canadá.

### 8.2 AREAS DE EXPOSICION TOPOGRAFICAS.

Las áreas de exposición topográficas que se proponen son las consideradas por el reglamento de Canadá y descritas en la sección (7.2).

### 8.3 VELOCIDAD MEDIA DE DISEÑO.

La expresión que se propone usar para la velocidad media de diseño es:

$$\bar{V}_z = \bar{V} \sqrt{C_e} F_s F_t F_i \quad (8.3.1)$$

donde:

- $\bar{V}_z$  velocidad media de diseño, en m/seg.  
 $\bar{V}$  es la velocidad media básica regional definida para cada área de exposición topográfica de la sección (8.2), tomada a una altura de 10m. sobre el terreno y expresada, en m/seg.
- $C_e$  factor de exposición, definido en la sección (7.2)
- $F_s$  multiplicador de protección definido en la sección (7.3.4.1)
- $F_t$  multiplicador topográfico definido en la sección (7.3.3)
- $F_i$  multiplicador de importancia de la estructura, definido en la tabla (7.3.4.2.4)

Como se ve la ecuación (8.3.1) es en base al reglamento de Canadá modificada por factores propuestos por el reglamento de Australia.

#### 8.4 PRESION MEDIA DE DISEÑO.

Para definir la presión media del viento se propone:

$$\bar{P}_z = q_z C_e F_s^2 F_t^2 F_1^2 \quad (8.4.1)$$

donde:

$P_z$  presión media de diseño, en  $\text{kg/m}^2$

$q_z$  presión básica de diseño, en  $\text{kg/m}^2$   
 $= 101.94 C \bar{V}^2$

$C$  es un factor que depende de la presión atmosférica y temperatura del aire, que en Canadá se toma igual a 0.00065 mientras que en Australia se propone 0.0006, pero que para México tendría que redefinirse, en función de las variantes antes mencionadas.

#### 8.5 FACTOR DE AMPLIFICACION DINAMICO O FACTOR RAFAGA.

Por las razones expuestas en la sección (7.4) se propone usar el factor de amplificación dinámica propuesto por el reglamento de Canadá en la ecuación (7.2.1), en la que  $V_H$  deberá ser calculada de acuerdo a la expresión (8.3.1), evaluada para  $z=H$ , y el valor de  $\beta_0$  se podrá tomar de la tabla (7.3.5.1).

#### 8.6 RESPUESTA LONGITUDINAL DEL EDIFICIO.

El cálculo de la respuesta longitudinal se propone calcularse como sigue:

##### 8.6.1 Momento amplificado de volteo longitudinal.

Para el cálculo del momento amplificado de volteo longitudinal, se propone que sea calculado con la expresión:

$$\hat{M}_L = C_g \bar{M}_L \quad (8.6.1.1)$$

donde:

$\hat{M}_L$  Es el momento amplificado de volteo longitudinal aplicado en la base del edificio, en kg-m.

$\bar{M}_L$  Es el momento medio de volteo longitudinal aplicado en la base del edificio y definido en la sección (8.6.2), en kg-m.

### 8.6.2 Cálculo de $\bar{M}_L$ .

El momento medio longitudinal puede ser calculado a través de la integración de la ecuación:

$$\bar{F}_z = \bar{P}_z B C_p \quad (8.6.2.1)$$

donde:

$\bar{F}_z$  fuerza media por unidad de longitud, en kg/m., distribuida sobre la altura del edificio

B ancho del edificio en m. (ver fig. 4.1.1)

$C_p$  coeficiente de presión, definido en la sección (4.2)

La integración de la ecuación (8.6.2.1) deberá hacerse para la pared de barlovento y sotavento, teniendo como base la distribución de presión mostrada en la fig. (8.6.2.1), donde:

H1 = 10 para área de exposición A

H1 = 12.7 para área de exposición B

H1 = 30 para área de exposición C

### 8.6.3 Cálculo del desplazamiento máximo inducido por el viento.

El desplazamiento máximo se propone sea calculado mediante la ecuación (ref. 2):

$$\Delta = \frac{0.0294 \int_0^H z P(z) dz}{4 \pi^2 n_L^2 c \rho_b H^2} \quad (8.6.3.1)$$

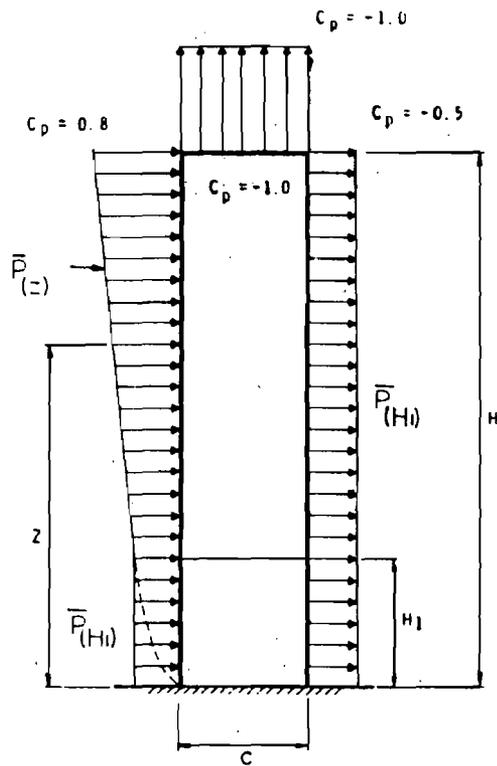


Fig. 8.6.2.1

donde:

- $\Delta$  desplazamiento máximo inducido por el viento en dirección longitudinal y en la parte más elevada del edificio, en m.
- $z$  altura sobre el nivel de terreno, en m.
- $P_{(z)}$  presión del viento, en  $\text{kg/m}^2$   
 $= \bar{P}_z C_g C_p$
- $n_L$  frecuencia natural del edificio en dirección longitudinal, en Hertz.
- $c$  dimensión del edificio en la dirección longitudinal, en m., (ver fig. 4.1.1)
- $\rho_b$  densidad promedio de la estructura, en  $\text{kg/m}^3$
- $H$  altura del edificio, en m.

La integral de la ecuación (8.6.3.1) se integrará tomando en cuenta las paredes de barlovento y sotavento (ver fig. 8.6.2.1).

#### 8.6.4 Cálculo de la aceleración máxima inducida por el viento.

La aceleración máxima se propone que se calcule con la ecuación (ref. 2):

$$a_L = 4\pi^2 n_L^2 g_p \sqrt{\frac{K s F}{C_e \beta_L} \left[ \frac{\Delta}{C_g} \right]} \quad (8.6.4.1)$$

donde:

- $a_L$  aceleración máxima longitudinal en la parte más elevada del edificio, en  $\text{m/seg}^2$
- $\beta_L$  fracción del amortiguamiento crítico longitudinal obtenido de la tabla (7.3.5.1)
- $g_p$ ,  $K$ ,  $s$ ,  $F$  y  $C_e$  son definidas en la sección (7.2).  $C_e$ , deberá ser evaluado para  $z=H$ .

La ecuación (8.6.4.1), de acuerdo a la ref. 2, es aplicable a estructuras esbeltas ó a velocidades bajas del viento. Además se recomienda que  $(a_L/g) = 0.01$ , ocurra una vez cada 10 años para

edificios de departamentos, y  $(a_L/g) = 0.03$ , ocurra una vez cada 10 años para edificios de oficinas, siendo  $g$  la aceleración de la gravedad, en  $m/seg.^2$ . Estos límites son establecidos en base a la sensibilidad humana a la aceleración del edificio.

## 8.7 RESPUESTA TRANSVERSAL PARA EDIFICIOS.

(Ver comentario F4.4.3 de la referencia 1).

La respuesta transversal se propone se calcule como sigue:

### 8.7.1 Cálculo del momento transversal amplificado.

De acuerdo con la literatura, la formación de vórtices periódicos ocasiona efectos transversales en las estructuras donde actúan. El reglamento de Australia propone una ecuación, que de acuerdo al mismo, la técnica empleada para llegar a tal ecuación es la solución de la ecuación de movimiento en forma modal para estructuras ligeramente amortiguadas, con la función de fuerza generalizada en un formato espectral. Dicha ecuación es:

$$\hat{M}_T = 0.05 g_f \bar{P}_H B H^2 (1.06 - 0.08k) \sqrt{\frac{\pi C_{fs}}{\beta_0}} \quad (8.7.1)$$

donde:

$\hat{M}_T$  es el momento de volteo amplificado transversal aplicado en la base del edificio, en kg-m.

$g_f$  factor de pico.  
 $= \sqrt{2 \ln(3600 n_T)}$

$\bar{P}_H$  la presión dinámica media horaria en la altura  $H$ , en  $kg/m.^2$  que puede ser calculada con la ecuación (8.4.1), evaluada para  $Z=H$

$B$  ancho del edificio en metros, en dirección perpendicular a la de ataque del viento

$H$  altura del edificio, en m.

$k$  = 1.5 para edificios considerados como un cantiliver en

dirección transversal  
 = 0.5 para estructuras a base de marcos ligeros en  
 dirección transversal  
 = 1.0 para edificios con corazón central y momento  
 resistido por fachada en dirección transversal  
 $C_{fs}$  coeficiente de la fuerza espectral transversal para un  
 modo de pandeo lineal, que se obtiene de las  
 figuras (8.7.1) y (8.7.2). Estas curvas, de acuerdo al  
 reglamento de Australia, están basadas en el modo  
 fundamental de vibración de la estructura, el cual  
 tiene una forma lineal de pandeo  
 $\beta_0$  amortiguamiento crítico, obtenido de la tabla(7.3.5.1)  
 $n_T$  frecuencia natural de vibración en dirección  
 transversal, en Hertz

El reglamento también comenta que el término  $(1.06 - 0.06k)$ ,  
 de la ecuación (8.7.1), tiene la finalidad de hacer correcciones  
 en las fuerzas de inercia y masa generalizada, así como al  
 espectro de fuerza generalizada de la dirección transversal.

En el apéndice A se presenta un método alternativo para el  
 cálculo de las fuerzas transversales, producidas por vórtices  
 periódicos.

### 8.7.2 Cálculo de la aceleración máxima inducida por el viento.

La aceleración máxima se propone que se calcule con la  
 ecuación (ref. 2):

$$a_T = n_T^2 g_p \sqrt{B c} \left( \frac{a_r}{\rho_b g \sqrt{\beta_T}} \right) \quad (8.7.2.1)$$

donde:

$a_T$  aceleración máxima transversal en la parte más  
 elevada del edificio en  $m/seg.^2$   
 $n_T$  frecuencia natural del edificio en dirección

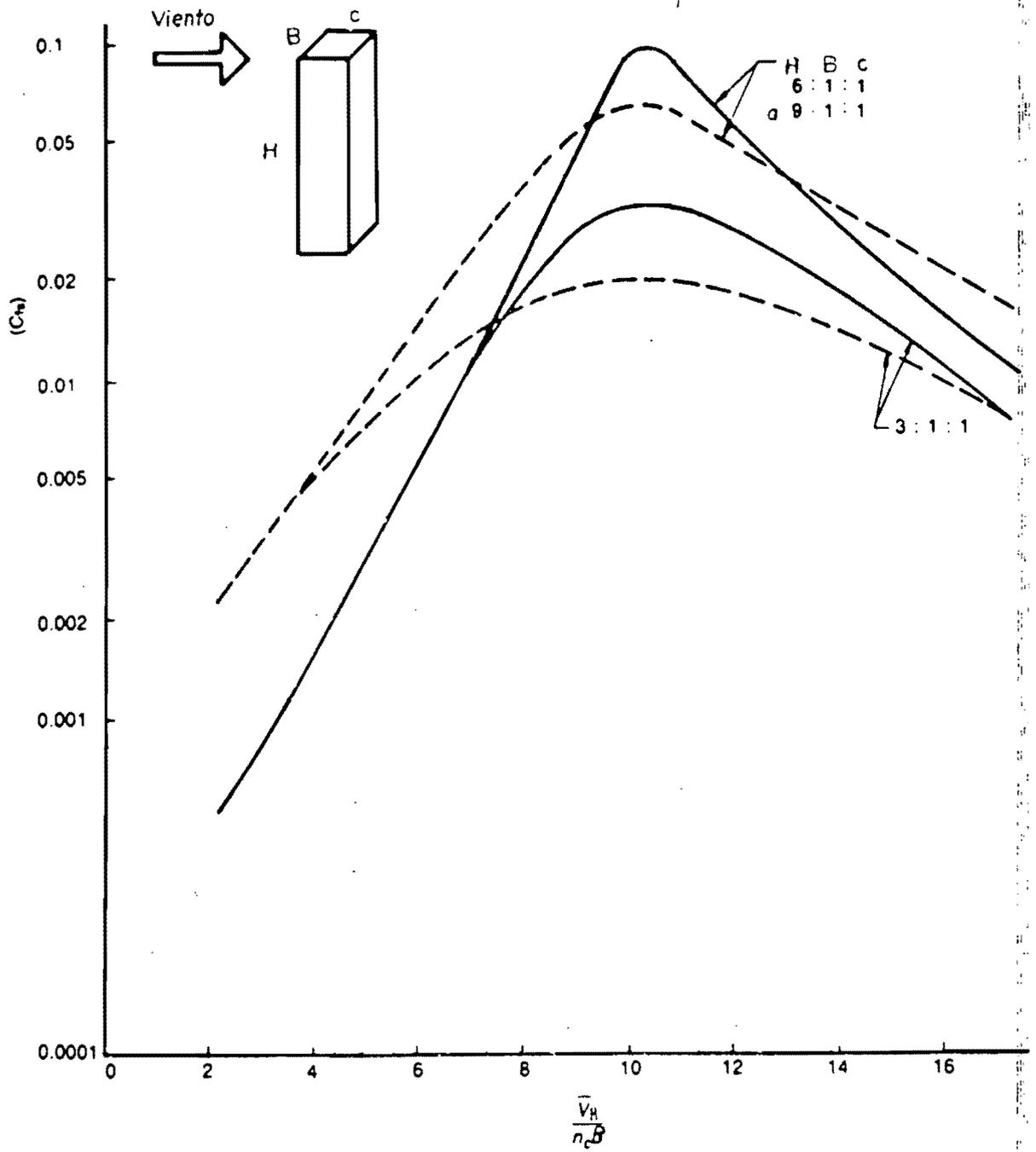


Fig. 8.7.1

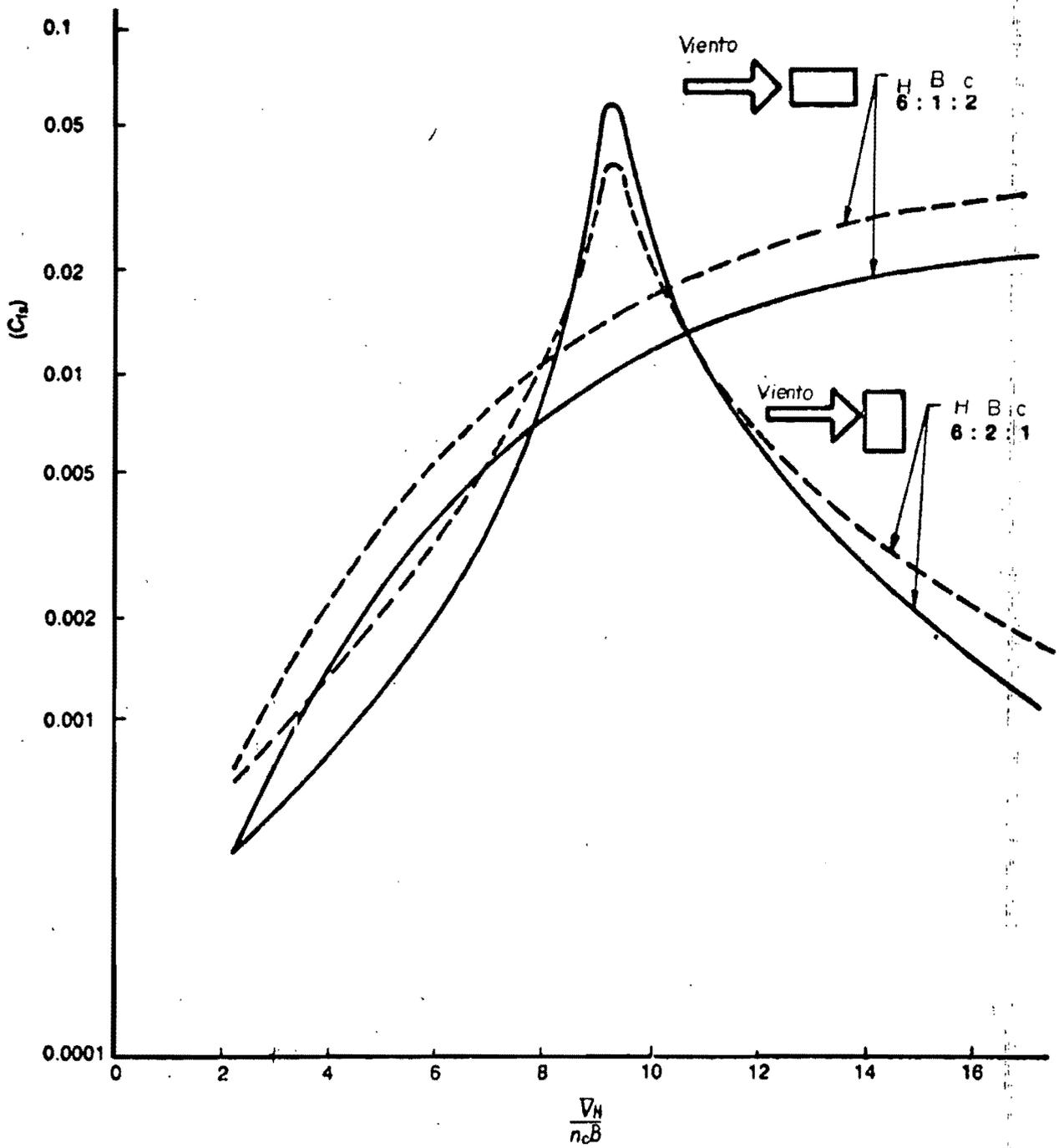


Fig. 8.7.2

transversal en Hertz.

$$a_r = 78.50 \times 10^{-6} \left( \bar{V}_H / (n_T \sqrt{B c}) \right)^{3.3}$$

$\beta_T$  fracción del amortiguamiento crítico en dirección transversal, tomado de la tabla (7.3.5.1)

Los límites de  $a_T/g$  son los mismos que para  $a_L/g$ .

## 8.8 ANALISIS ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO.

Para el análisis estructural del edificio se propone que se lleve a cabo sometiendo a la estructura a los momentos  $\hat{M}_L$  y  $\hat{M}_T$  simultáneamente.

## 9. - COMENTARIOS FINALES.

Se ha realizado una revisión bastante amplia de los criterios más usados para determinar la acción turbulenta del viento en las estructuras. Se hace referencia principalmente a dos reglamentos para diseño por cargas de viento, el reglamento de Australia y el de Canadá, ello se debe a que es la información más reciente de que se dispone. Sin embargo, aunque se dice que la información del reglamento de Australia es lo último en cuanto a diseño por viento, se ha visto durante el desarrollo de este trabajo, que no todos los conceptos que menciona están debidamente fundamentados, lo cual hace, como ya se mostró, que su aplicación sea limitada.

Dentro de todo lo que se ha escrito, lo que presenta la mayor complicación, fue lo que se refiere a proponer un procedimiento de cálculo, ya que esto implicaba el hacer uso de toda la información anterior, entenderla, y junto con ello extraer lo necesario para así proponer los elementos suficientes para realizar un diseño por viento.

Es indispensable comentar que para que las ideas propuestas puedan ser aplicadas en nuestro medio, es de suma importancia ajustes como los que se exponen a continuación:

- 1) Las áreas de exposición topográfica deberán ser definidas de acuerdo a una zonificación del territorio nacional.
- 2) La velocidad media básica  $\bar{V}$ , y el factor de exposición  $C_e$ , tendrán que ser redefinidos para cada área de exposición topográfica.
- 3) Finalmente el coeficiente  $C$ , descrito en la sección (8.4) y que depende de la presión atmosférica y temperatura del aire, tiene que ser ajustado de acuerdo a las condiciones de nuestro medio.

Los ajustes arriba descritos son complejos y requieren de estudios bastante detallados, razón por la cual quedan fuera del alcance de este trabajo.

## 10. - REFERENCIAS.

- 1) SAA loading Code.  
Part 2: Wind Loads.  
Editado por : Australian Standard. 1989.
- 2) National Building Code.  
Canadá 1980.
- 3) Rodríguez C. N., Levi E., Echavez A. G. . FLUID-STRUCTURE INTERACTION.  
Editado por: Instituto de Ingeniería. UNAM.
- 4) Venegas C. B. R.. ANALISIS POR VIENTO DE UNA ESTRUCTURA CON CIMENTACION FLEXIBLE.  
Tesis DEPI. UNAM. 1991.
- 5) Rodríguez C. N.. Apuntes de: DISEÑO EOLICO DE ESTRUCTURAS DEPI. UNAM. Semestre 90-II. 1990.
- 6) Reglamento de contrucciones y normas técnicas complementarias para diseño por viento .  
Editado por : Departamento del Distrito Federal. 1987.
- 7) Lungu D. and Ghiocel D. . WIND, SNOW AND TEMPERATURE EFFECTS ON STRUCTURES BASED ON PROBABILITY.  
Editado por: Abacus Press. Bucarest, Rumania. 1975.
- 8) Reyes S. J. C. . Trabajo de investigación : RESPUESTA BIDIMENSIONAL DE ESTRUCTURAS SUJETAS A CARGAS LATERALES.  
DEPI. UNAM. 1991.
- 9) Wyatt, TA. THE MODERN DESING OF WIND-SENSITIVE STRUCTURES.  
Editado por: CIRIA Piblicaton, Londres, Inglaterra. 1971.

- 10) Amavizca R. RESPUESTA DINAMICA DE ESTRUCTURAS BAJO LA ACCION TURBULENTO DEL VIENTO.  
Tesis DEPI. UNAM. 1984.
- 11) White M. F. MECANICA DE FLUIDOS .  
Editado por: McGraw-Hill, -México. 1990.
- 12) Kolousek V., Pirner M., Fisher O., and Närprsteck J.  
WIND EFFECTS ON CIVIL ENGINEERING STRUCTURES.  
Editado por : Elsevier, Amsterdam. 1984.

**A. - APENDICE A: METODO ALTERNATIVO PARA EL CALCULO DE FUERZAS TRANSVERSALES A LA ACCION DEL VIENTO DEBIDAS A VORTICES ALTERNANTES.**

El método que se menciona, es el que actualmente está proponiendo el Instituto de Investigaciones Eléctricas de la Comisión Federal de Electricidad, con el fin de tener en cuenta el efecto de las fuerzas transversales ocasionadas por vórtices alternantes.

**A.1 VELOCIDAD CRITICA DE VORTICES ALTERNANTES.**

La velocidad crítica  $V_{cv}$ , es aquella en la que la frecuencia de la estructura se sincroniza con la frecuencia de los vórtices alternantes provocando este hecho efectos de resonancia transversal; se expresa mediante:

$$V_{cv} = n_o B / S_t \quad (A.1.1)$$

donde:

- $V_{cv}$             velocidad crítica en la que se presentan los vórtices alternantes, en m/seg.
- $n_T$             frecuencia natural de la estructura en dirección transversal a la del viento, en Hertz
- $S_t$             número de Strohual, adimensional, que depende de la forma de la estructura
- $B$             ancho de la estructura, en m.

Para estructuras rectangulares prismáticas,  $S_t$  es aproximadamente igual a 0.14.

**A.2 FUERZA TRANSVERSAL INDUCIDA EN EDIFICIOS.**

Si la velocidad media de diseño calculada a la altura  $H$ ,  $\bar{V}_H$ , resulta igual o mayor que la velocidad crítica de aparición de los vórtices,  $V_{cv}$ , deberán evaluarse los efectos de vibración que éstos producen. Los efectos de esas vibraciones en las estructuras se presentarán como una fuerza estática equivalente, a

continuación se propone un procedimiento para evaluarla.

Para edificios se tomará la condición más desfavorable de las siguientes:

Condición 1: El periodo  $T_k$  de la fuerza alternante es:

$$T_k = \frac{B}{S_t \bar{V}_H} \quad (\text{A.2.1})$$

y la amplitud de la fuerza es:

$$W_k = C_k B q_z$$

Condición 2: El periodo  $T_k$  de la fuerza alternante, es igual a  $T_o$ , y la amplitud de la fuerza es:

$$W_k = \frac{22 C_k B^3 q_z}{(3.6 \bar{V}_z S_t T_o)^2} \quad (\text{A.2.2})$$

Esta segunda condición se descartará si  $\bar{V}_H < V_{cv}$  por lo que sólo se revisará la condición 1.

Los parámetros de las condiciones anteriores se definen como sigue:

$W_k$	amplitud de la fuerza alternante por unidad de longitud sobre el eje de la estructura, en kg/m.
$T_k$	periodo de la fuerza alternante, en seg.
$T_o$	periodo natural de la estructura en seg.
$B$	ancho de la estructura perpendicular al flujo, en m.
$S_t$	número de Strohual, adimensional
$\bar{V}_z$	velocidad media de diseño, en m/seg., según la sección (8.3)

$\bar{V}_H$   
 $q_z$

velocidad media de diseño, en m/seg., para  $z=H$   
presión básica de diseño, en  $\text{kg/m}^2$ , según la sección  
(8.4)

El coeficiente de empuje transversal  $C_k$  se determinará de la siguiente manera:

$$C_k = 1.5 \quad \text{si } 3.6 \bar{V}_H B \leq 180$$

$$C_k = 0.5 + \frac{50}{3.6 \bar{V}_H D} \quad \text{si } 3.6 \bar{V}_H B > 180$$

Agradezco de manera especial, el tiempo que el Ing. Neftalí Rodríguez Cuevas dedicó, a través de sus valiosas explicaciones, a la realización de este trabajo.