



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

Facultad de Ingeniería

28

174

**ACCION DEL VIENTO EN LAS ESTRUCTURAS**

**TESIS PROFESIONAL**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO CIVIL**

**P r e s e n t a :**

**SAID RAMIREZ SABAG**

México, D. F.

Mayo 1983



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.

## C O N T E N I D O

### CAPITULO I. EFECTOS DEL VIENTO EN LAS ESTRUCTURAS

I.1.	Introducción.. . . . .	.2
I.2.	Naturaleza del viento. . . . .	.5
I.3.	Estadísticas de viento. . . . .	6
I.4.	Velocidades de diseño. . . . .	10
I.5.	Cálculo de las fuerzas por viento. . . . .	13

### CAPITULO II. VELOCIDADES DE VIENTO.

II.1.	Registros de velocidades de viento. . . . .	.23
II.2.	Registros de velocidades de viento en México. . .	.26
II.3.	Variación de la velocidad del viento con la altura. . . . .	.29

CAPITULO III. AREA EXPUESTA AL VIENTO.

III.1. Presión del viento en la estructura. . . . .38

III.2. Coeficientes de empuje según la A.S.C.E. . . . .40

III.3. Estudio experimental de coeficientes de empuje en torres tubulares de acero de sección cuadrada. . . . . 48

CAPITULO IV. EJEMPLO ILUSTRATIVO. TORRE TELEVISIVA.

IV.1. Descripción del problema. . . . . 60

IV.2. Análisis de las fuerzas por viento de acuerdo con el Manual de la Comisión Federal de Electricidad. . . . .61

IV.3. Análisis de las fuerzas por viento de acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. . . . . 67

IV.4. Utilización de los coeficientes de empuje según la A.S.C.E. . . . . 72

IV.5. Utilización de los coeficientes de empuje según estudios japoneses. . . . . 77

IV.6. Cuadros comparativos. . . . . 80

CAPITULO V. CONCLUSIONES . . . . .84

BIBLIOGRAFIA

# CAPITULO I

## EFFECTOS DEL VIENTO EN LAS ESTRUCTURAS

I. 1.- INTRODUCCION

I. 2.- NATURALEZA DEL VIENTO

I. 3.- ESTADISTICAS DE VIENTO

I. 4.- VELOCIDADES DE DISEÑO

I. 5.- CALCULO DE LAS FUERZAS POR VIENTO

## 1.1.- INTRODUCCION

Toda estructura debe satisfacer simultáneamente las dos condiciones siguientes:

1. Comportarse correctamente en condiciones de servicio.
2. Tener un coeficiente de seguridad adecuado contra la falla.

Para lograr lo anterior, el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal indica que la seguridad de toda estructura ha de verificarse para el efecto combinado de todas las acciones que tengan una probabilidad, no despreciable, de ocurrir simultáneamente. Deben considerarse dos clases de combinaciones: - aquellas que incluyen acciones permanentes y variables y las que incluyen acciones permanentes, variables y accidentales; en este segundo caso deben considerarse -- todas las acciones permanentes, las variables con sus valores instantáneos y únicamente una acción accidental en cada combinación.

De acuerdo a esto, en el análisis y diseño de toda estructura deben considerarse, cuando menos, las cargas muertas y vivas en combinación con los efectos -- producidos por el viento o por el temblor de diseño.

En las estructuras de características ordinarias que se construyen en la ciudad de México, generalmente los efectos más desfavorables son los producidos por los temblores de tierra, que son frecuentes y de intensidad media o alta. Sin embargo, en estructuras especiales como en naves industriales, torres para anuncios, torres para líneas de transmisión y en general estructuras muy altas, el viento - puede ocasionar problemas serios.

Al hacer la revisión por viento, de una estructura, encontramos que si aplicamos las especificaciones dadas en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, obtenemos fuerzas excesivas y si nos basamos en esas fuerzas, las secciones de los elementos estructurales resultan exageradamente grandes.

En muchas partes del mundo podemos encontrar fallas estructurales debidas a las fuerzas del viento. Existen fracasos en puentes como son el "Brighton Chair

Pier Bridge" (1836, Brighton, Inglaterra), el "Tacoma Narrows Bridge" (1854, Washington, E.E.U.U.), el "Chester Bridge" (1944, Illinois, E.E.U.U.). También hay numerosos ejemplos de fallas en edificaciones debidas al viento, uno de los más recientes es el colapso del edificio "Union Carbide" en Toronto, Canada en 1958. En México se han tenido problemas con muchas estructuras, sobre todo en torres para líneas de transmisión, torres para antenas, estructuras para anuncios, etc.

El estudio del viento se inició con Galileo<sup>1</sup> en 1655 y Newton<sup>2</sup> en 1687, continuándose hasta el presente. Quien ha dado la mayor información referente a las aplicaciones en Ingeniería Civil es W. Watters Pagon<sup>3</sup>.

Las fuerzas del viento en cualquier estructura, o elemento estructural, resultan de la diferencia de presiones en dichos elementos, causada por la obstrucción al flujo libre del viento. Por lo que, estas fuerzas son función de la velocidad del viento y de la orientación, área y forma de los elementos estructurales. El túnel de viento facilita la medición de las fuerzas resultantes del viento y la "Mecánica de Fluidos" permite una interpretación racional de dichas pruebas. Los experimentos hechos por N.V. Duchemein<sup>4</sup> (1842) y John Smeaton<sup>5</sup> (1759) forman la base para las fórmulas generalmente aceptadas para fuerzas de viento en estructuras.

La determinación de las fuerzas del viento en una estructura es básicamente un problema dinámico, no obstante, normalmente se consideran fuerzas de carga estáticas, sin olvidar su carácter dinámico. En este capítulo estudiaremos de manera general el cálculo de las fuerzas del viento. En el capítulo II veremos lo relacionado con las velocidades de diseño del viento, incluyendo una sección referente a los registros de velocidades de viento en México y lo que se está haciendo para mejorar dichos registros.

En el capítulo III se expone lo relacionado al área expuesta, los coeficientes de empuje que propone la A.S.C.E. (American Society of Civil Engineers), y un estudio hecho en Japón por Kamei y Uzuki, de coeficientes de empuje en torres tubulares de acero con sección cuadrada.

En el capítulo IV se presenta un ejemplo real, la nueva torre de Televisa ubicada en el centro de la ciudad de México.. En esta estructura se calculan - las fuerzas de viento de acuerdo al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y al Manual de la Comisión Federal de Electricidad. Además se aplican los coeficientes de empuje propuestos por la A.S.C.E. y por Karæi-Uzuki (presentados en el capítulo anterior), terminando con una comparación de los resultados obtenidos en los cuatro cálculos.

En el capítulo V se exponen las conclusiones de este estudio.

## I.2.- NATURALEZA DEL VIENTO.

El viento puede definirse como el movimiento horizontal o paralelo a la superficie del terreno de una masa de aire. Se caracteriza por la dirección y la velocidad. La primera es la dirección geográfica desde la cual se mueve la masa del aire. La velocidad se expresa en m/s o km/h y se determina con un anemómetro. Las causas de que se origine el viento son: la diferencia de la presión atmosférica y la rotación terrestre que obligaa las masas de aire en movimiento a desviarse hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el sur. El aire nunca fluye con una trayectoria perfectamente definida pero siempre con fluctuaciones horizontales y verticales que, cuando ocurren de repente y relativamente cortas, son llamadas ráfagas.

El viento posee energía cinética en virtud de la velocidad y masa del aire en movimiento. Si un obstáculo es colocado en la trayectoria del viento, el aire en movimiento es interrumpido y desviado provocando que toda o parte de su energía cinética se transforme en energía potencial de presión. La intensidad de la presión en cualquier punto depende de la forma del obstáculo, el ángulo de incidencia del viento y la velocidad y densidad del aire.

Todas las fuerzas debidas al viento son dinámicas en el sentido de que son producidas por un fluido en movimiento. Bajo determinadas circunstancias, un cuerpo sumergido en un fluido con velocidad constante, experimenta fuerzas que se podrían llamar estáticas. En la realidad, no suele presentarse este fenómeno ya que generalmente existen variaciones en la velocidad del fluido, o bien la geometría de la estructura también produce cambios en las presiones ejercidas sobre el sólido. Estas variaciones pueden ser tanto de magnitud como en la ley de distribución de fuerzas.

En algunos casos, bastará con representar la acción del viento como una fuerza estática de determinadas características. En otros, esto no será sufi-

ciente y habrá que tomar en cuenta los efectos dinámicos producidos en el sólido por una fuerza que es función del tiempo. En determinadas formas estructurales se podrán predecir los efectos dinámicos del viento, pero en otras será necesario realizar pruebas experimentales con modelos físicos en un túnel de viento.

### I.3.- ESTADISTICA DE VIENTOS.

En las diferentes regiones de nuestro país, la determinación confiable y precisa de la velocidad del viento es de fundamental importancia para el diseño de estructuras por fuerzas debidas al viento. Como veremos más adelante, en la expresión para el cálculo de las fuerzas por viento la velocidad aparece elevada al cuadrado, lo que refleja que una pequeña variación en la velocidad causaría una variación considerable en las fuerzas calculadas.

Para contar con dicha información es de suma importancia estudiar los registros de velocidades proporcionados por anemógrafos. Es necesario referir la velocidad del viento a un punto sobre el terreno, ya que dicha velocidad varía con la altura. Generalmente las velocidades se miden a una altura de 10.00 m. En caso de que los anemómetros estén instalados a diferentes alturas, es necesario hacer algunos ajustes de acuerdo a las leyes de variación del viento con la altura. La figura I.3.1. muestra un registro típico de velocidades obtenido en la ciudad de México el día 4 de marzo de 1983.

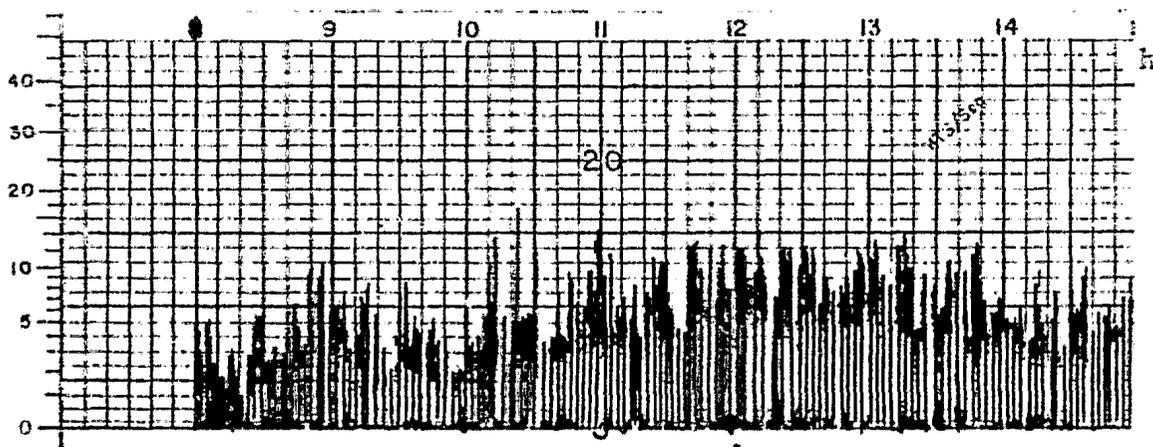


Fig. I.3.1.- Registro de velocidades de viento.

Los vientos de una localidad determinada forman parte de las condiciones climáticas de ésta. Para estimar la velocidad máxima del viento se recurre a información estadística. Sin embargo, dadas las incertidumbres inherentes al fenómeno, siempre existe la probabilidad de que ocurra un viento con velocidad mayor al valor máximo estimado.

Si se emplea la probabilidad para manejar la información estadística, puede llegarse a una distribución del viento máximo con la cual es posible conocer la probabilidad de que sea excedido un valor de viento máximo cualquiera.

Para fines de diseño, la velocidad máxima del viento se establece seleccionando una probabilidad de excedencia. Es obvio que a un valor menor de éste corresponde un valor mayor de velocidad máxima de viento.

Asociado al valor máximo, es común hacer referencia al período de recurrencia, que es el recíproco algebraico de la probabilidad de excedencia indicando cada cuántos años se espera que ocurra un viento con dicho valor. El manual de diseño por viento de la Comisión Federal de Electricidad muestra la regionalización de la República Mexicana de acuerdo a las velocidades de viento que se han presentado (Fig. I.3.2.), e indica, para cada una de estas zonas, las velocidades regionales ( $V_R$ ) para períodos de recurrencia de 50 y 200 años, esto es con probabilidad de excedencia de 2% y 5% respectivamente (Tabla I.3.1.). La elección de la velocidad regional para diseño se hace en base a la importancia de la estructura. Las velocidades regionales que se muestran son representativas de toda una zona y pueden no ser estrictamente aplicables en localidades específicas dentro de ella. Dichas velocidades, entonces, han de considerarse como mínimas. En lugares donde se tengan registros de vientos mayores a las velocidades regionales, éstos deberán usarse para estimar las velocidades de diseño. Podemos mencionar que las velocidades del huracán "Paul" ocurrido en septiembre de 1982, que afectó a Baja California Sur y Sinaloa, alcanzaron un valor máximo de 155 km/h y ráfagas de 135 km/h sobre la población de Topolobampo, Sinaloa. De acuerdo a la Regionalización de la República, dicha ciudad se encuentra en la zona 1 y lo

corresponde una velocidad regional de 150 km/h.

TABLA I.3.1.- VELOCIDADES REGIONALES

ZONA EOLICA (FIG. 1.3.2.)	VELOCIDAD REGIONAL (km/hora)	
	ESTRUCTURAS GRUPO B ( $T_R = 50$ años)	ESTRUCTURAS GRUPO A ( $T_R = 200$ años)
1	90	105
2	125	150
3	115	125
4	160	185
5	80	90
6	150	170
7	80	95

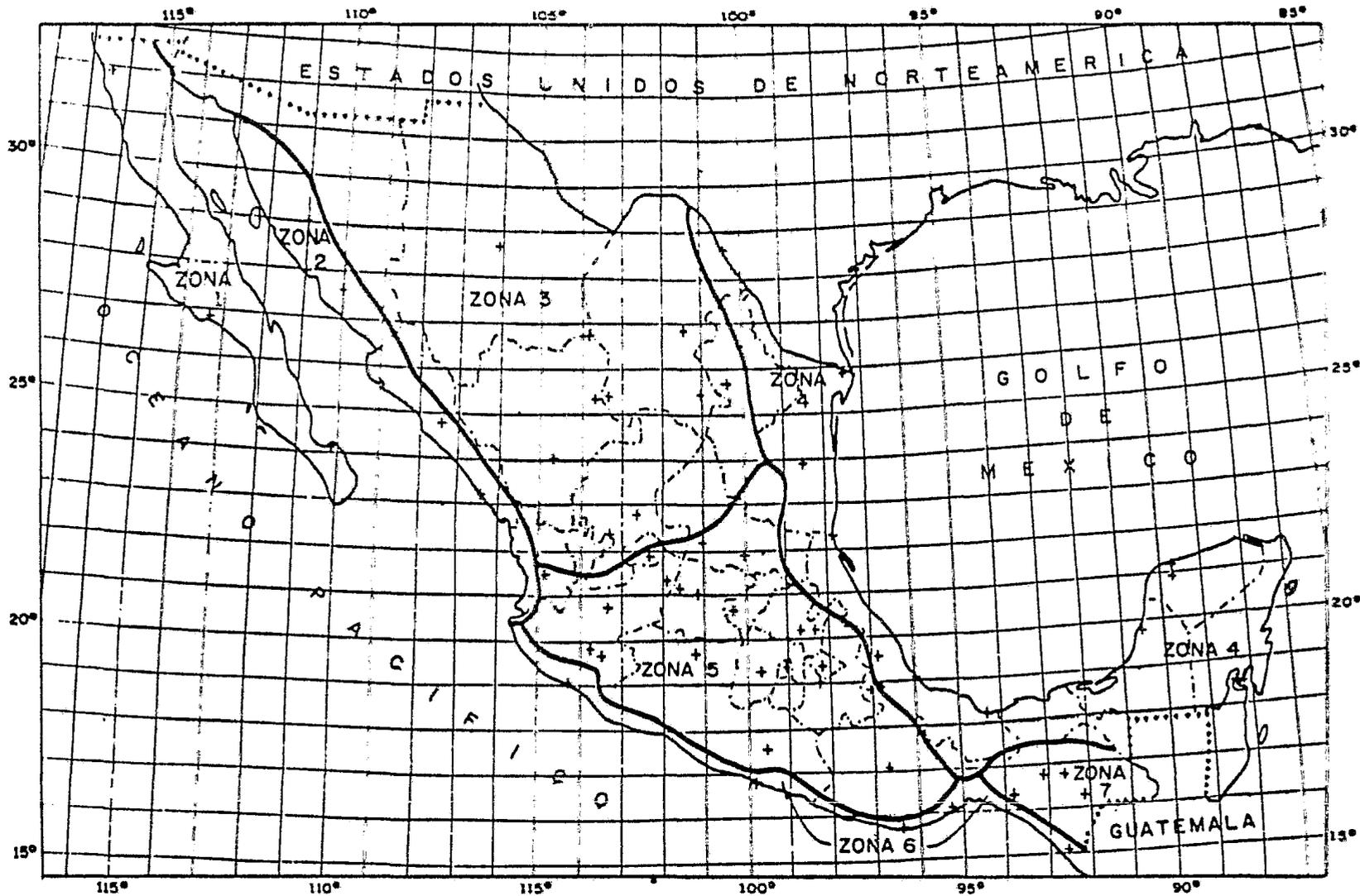


Fig. I.3.2.- Regionalización eólica de la República Mexicana.

#### I. 4.- VELOCIDADES DE DISEÑO.

La teoría y la experiencia concuerdan al afirmar que cuando actúa una corriente de aire paralelamente a la superficie rugosa del terreno, la fricción entre ambos medios hace que la velocidad se reduzca en la vecindad de la superficie de contacto, hasta ser nula a una distancia infinitamente pequeña a ella. Si se miden velocidades medias de viento, a diversas alturas a lo largo de una vertical, se observa que la velocidad varía aumentando en relación a la altura, esta variación es menor a mayor altura, hasta considerarse una velocidad constante. La velocidad del viento por encima de esa altura, denominada "altura - gradiente" es conocida como "velocidad gradiente" (Fig. I.4.1.).

La "altura gradiente" varía con la configuración del terreno, siendo valores representativos 600 m. para zonas muy accidentadas, como el centro de una ciudad importante, y 300 m. para terrenos muy planos, como la orilla del mar. Entre el nivel del terreno y la altura a la que se presenta la velocidad gradiente, la velocidad media varía de acuerdo con una ley que puede representarse por la ecuación:

$$V_{\text{diseño}} = V_B \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha$$

En donde:

$V_{\text{diseño}}$ : Velocidad de diseño a una altura "Z" sobre el terreno (km/h).

$V_B$ : Velocidad básica (km/h)

$Z_0$ : 10 m.

$\alpha$ : coeficiente que depende del tipo de terreno (Tabla I.4.1.)

La velocidad básica se obtiene:

$$V_B = KV_R$$

donde:

$V_R$ : Velocidad Regional

K: Factor que depende de la topografía (Tabla I.4.2.)

Con las siguientes expresiones podemos obtener la velocidad de diseño a cualquier altura:

$$V_Z = V_B \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha \quad \text{para } 10 < Z < \delta$$

$$V_Z = V_B \quad \text{para } Z \leq 10 \text{ m.}$$

$$V_Z = V_\delta \quad \text{para } Z \geq \delta$$

Las unidades de  $Z$  y  $\delta$  son metros y de las velocidades son km/h.  $V_\delta$  es la velocidad que obtenemos al hacer  $Z = \delta$ .

Los valores  $\alpha$  y  $\delta$  son función del tipo del terreno del lugar y están en la Tabla I.4.1.

En estructuras esbeltas, debemos considerar otro efecto que es el que se produce por la acción de las ráfagas. Para valuar dicho efecto se necesitaría hacer un análisis detallado y determinar un factor de ráfaga que es función principalmente de las características de la estructura y de las características de las ráfagas que podrían presentarse. Este análisis es complejo y los Reglamentos marcan que si la estructura es de dimensiones tales que se necesite considerar dicho efecto simplemente se multiplique la velocidad de diseño por 1.3, esto es:

$$V_{\text{diseño}} = V_Z (1.3)$$

TABLA I.4.1.- VALORES DE  $\alpha$  Y  $\delta$ .

TIPO DE TERRENO	$\alpha$	ALTURA GRADIENTE $\delta$ (metros)
a) Litoral	0.14	200
b) Campo Abierto	0.14	275
c) Terrenos Sub-urbanos.	0.22	400
d) Centros de grandes ciudades	0.33	460

TABLA I.4.1.- FACTOR DE TOPOGRAFIA

TOPOGRAFIA	FACTOR K
a) Muy accidentada como en el centro de grandes ciudades.	0.70
b) Zonas arboladas, lomerios, barrios residenciales o industriales.	0.80
c) Campo abierto, terreno plano.	1.00
d) Promontorios	1.20

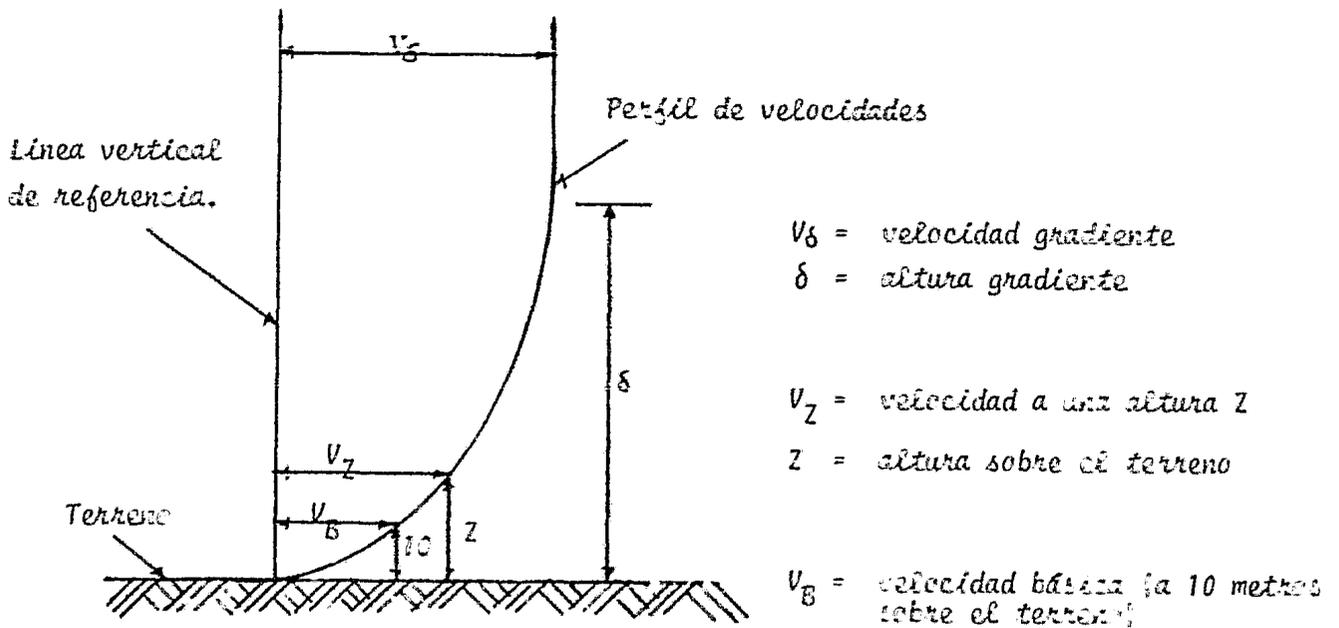


Fig. I.4.1.- Variación de la Velocidad del Viento con la Altura

## I. 5.- CALCULO DE LAS FUERZAS POR VIENTO.

Para el diseño de estructuras sometidas a la acción del viento, deben de tomarse en cuenta, de los siguientes efectos, aquellos que sean más importantes en función del tipo de estructura:

- a) Empujes estáticos (presiones y succiones) tanto interiores como exteriores, y tanto locales (para el diseño de un elemento estructural en particular), como generales (para el diseño de la estructura en conjunto).
- b) Vibraciones causadas por turbulencia, esto es, empujes dinámicos paralelos y transversales a la dirección del viento debidos a fluctuaciones en la velocidad del viento.
- c) Vibraciones transversales al flujo causadas por el desprendimiento de vórtices alternantes.
- d) Problemas especiales como estabilidad aerodinámica, aleteo o "flutter", etc.

### I. 5. 1. EMPUJES ESTATICOS

El cálculo de las presiones y succiones que el viento provoca al incidir sobre una superficie normal a su dirección, está basado en la llamada "presión dinámica de fluidos en movimiento" calculada a partir del Teorema de Bernoulli:

$$P = 1/2 \rho V^2$$

en donde:

P : presión dinámica producida para un fluido en movimiento ( $\text{kg/m}^2$ )

$\rho$  : densidad del aire ( $\text{kgseg}^2/\text{m}^4$ )

V : velocidad del fluido (m/seg)

Considerando la densidad del aire a nivel del mar (1 atmósfera de presión) y en condiciones medias de temperatura tenemos:

$$P = 1/2 (0.125) V^2$$

$$P = 0.062 V^2$$

Haciendo las transformaciones necesarias para obtener la presión en  $\text{kg/m}^2$  y la velocidad dada en  $\text{km/h}$ , obtenemos la siguiente expresión:

$$P = 0.0048 V^2$$

A esta expresión se han introducido dos factores, uno denominado factor de reducción de densidad de la atmósfera calculado mediante la expresión:

$$G = \frac{8 + h}{8 + 2h}$$

en donde  $G$  es el factor a la altura  $h$  en  $\text{km}$ . El otro factor es un coeficiente llamado Coeficiente de Empuje " $C$ ", sin dimensiones.

De manera que finalmente los efectos del viento se toman equivalentes a los de una fuerza distribuida sobre el área expuesta, dicha fuerza se supondrá perpendicular a la superficie en que actúa y su valor por unidad de área se calcula mediante la siguiente expresión :

$$P = 0.0048 G C V^2$$

Si multiplicamos la presión por el área expuesta al viento obtenemos la fuerza en  $\text{kg}$  que deberemos de considerar en el diseño de la estructura.

De manera que:

$$F = PA$$

Por área expuesta debemos de entender:

- a) El área total de la superficie, en superficies planas llenas.
- b) La proyección vertical de la construcción, en construcciones tipo torre de sección circular o aproximadamente circular.
- c) En estructuras reticulares tales como armaduras, el 20% del área limitada por las aristas exteriores de las armaduras (de acuerdo con el Manual de la C.F.E.) y la proyección de sus miembros sobre un plano normal a la dirección del viento (de acuerdo con el Reglamento del D.F.).
- d) La totalidad del área del primer diente, y la mitad del área para cada uno de los demás dientes, en techos con forma de dientes de sierra.
- e) La proyección vertical de la superficie, en techos formados por superficies

cilíndricas; la succión vertical, sin embargo, se valorará tomando el área de proyección horizontal del techo.

Coefficientes de empuje.- El valor de los coeficientes de empuje proviene de aproximaciones conservadoras a los valores experimentales, éstos, mediante expresiones más complicadas, pueden representarse con mayor precisión. Cuando  $C$  es positivo, se trata de empuje sobre el área expuesta, cuando es negativo se trata de succión.

En los reglamentos tanto de la Comisión Federal de Electricidad como el del D.F., podemos encontrar ampliamente los valores de  $C$  para todos los tipos de construcción. En la figura I.5.1. se muestran gráficamente los valores de  $C$  para el caso de edificios de planta y elevación rectangulares.

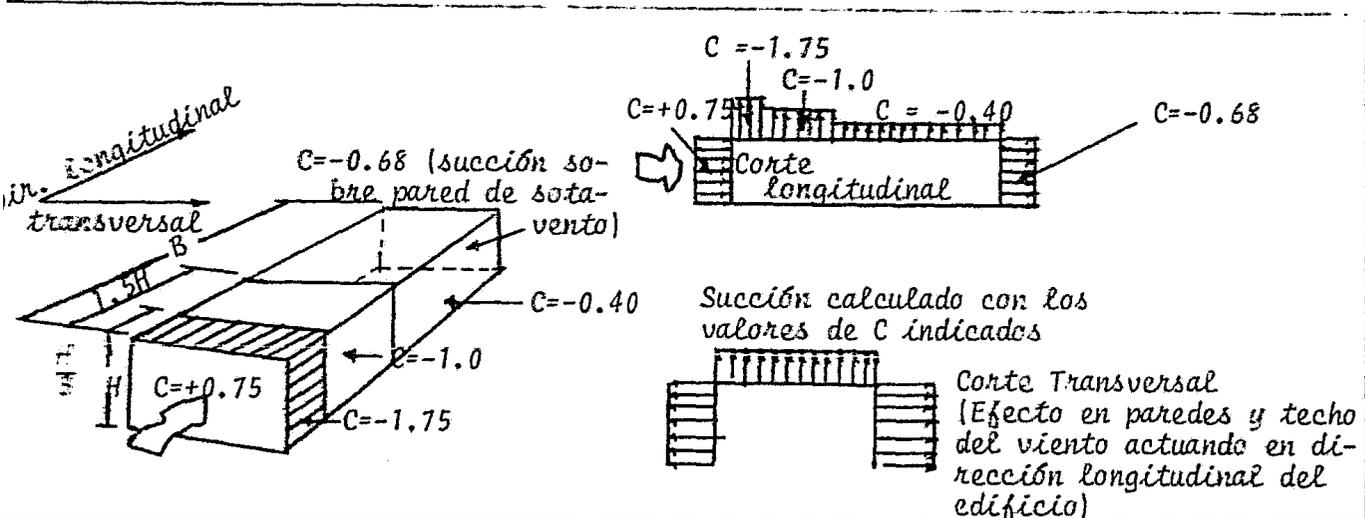


Fig. I.5.1.- Distribución del coeficiente de empuje. Edificios de planta y elevación rectangulares.

Presiones Interiores.- Cuando existen aberturas en los muros exteriores de una construcción, se presenta un flujo importante de aire a través de la estructura que produce presiones interiores adicionales a las exteriores. Los Reglamentos de la Comisión Federal de Electricidad y del Distrito Federal nos indican como obtener los coeficientes de empuje en caso de tener aberturas en nuestra estructura.

Excentricidades accidentales.- Debemos tomar en cuenta, al calcular las fuerzas en nuestra estructura, que se considera que la fuerza resultante de la acción del viento actúa excéntricamente con respecto a la posición de la resultante teórica de presiones, esto es, con respecto al centro de presiones del área expuesta, por lo que se aumenta un porcentaje al valor de la fuerza de acuerdo a lo establecido con los Reglamentos. Las implicaciones de excentricidad accidental se toman en cuenta especialmente en estructuras soportadas por un solo apoyo (o líneas de apoyo aproximadamente centradas, como ocasionalmente se estila en anuncios).

El análisis estático debe hacerse prácticamente para todos los tipos de estructuras (la clasificación de las estructuras por las características de sus -- respuestas ante el viento la podemos encontrar en los reglamentos). La Tabla I.5.1. muestra las diferencias entre las especificaciones para el D.F. (Reglamento del D.F.) y para la República Mexicana (Manual de la Comisión Federal de Electricidad).

TABLA I.5.1 CUADRO COMPARATIVO DE ESPECIFICACIONES.

	Reglamento de Construcciones para el D.F.	Manual de la Comisión F. de Electricidad.
1. Velocidad Regional	de 80 a 110 km/h	de 100 a 170 km/h
2. Velocidad básica	-----	$V_B = k_1 k_2 V_o$
3. Velocidad de diseño a una altura h.	$V_D = \left(\frac{h}{h_o}\right)^{1/3} V_o$	$V_D = \left(\frac{h}{10}\right) V_B$
4. Presión estática del viento. (C= coeficiente de ) empuje	$P = 0.0055 C V_D^2$	$P = 0.0048 C C V_D^2$ $C = \frac{8 + h}{8 + 2h}$

## 1. 5. 2.- VIBRACIONES CAUSADAS POR TURBULENCIA.

Estas vibraciones, debidas a fluctuaciones en la velocidad del viento, son empujes dinámicos paralelos y transversales a la dirección del viento. La acción del viento persistente puede idealizarse como la superposición de un gran número de excitaciones armónicas estacionarias de diferente frecuencia y amplitud. La respuesta máxima de una estructura de período natural y amortiguamiento dados, a cualquiera de las componentes armónicas estacionarias de la velocidad, pueden obtenerse a partir de las fórmulas de dinámica.

Si existe en proporción importante una componente de la velocidad que tenga una frecuencia próxima a la natural de la estructura, pueden producirse oscilaciones importantes. Cuando el amortiguamiento es bajo, la amplificación dinámica resulta excesiva y se pueden presentar amplitudes de vibración probablemente perjudiciales a pesar de que haya diferencias significativas entre el período de la estructura y el dominante del viento.

Del análisis espectral de registros de velocidades de viento se deduce que los períodos más peligrosos están comprendidos entre 2 y 100 seg. Para fines prácticos, se acostumbra hablar de períodos mayores de 2 seg., ya que el extremo superior se encuentra muy por encima de los que pueden esperarse en estructuras civiles.

Para tomar en cuenta este efecto, los Reglamentos nos indican multiplicar el valor de las velocidades de diseño obtenidas por el Factor de Ráfaga mencionado anteriormente. En realidad se debería de hacer un análisis detallado de las características de la estructura para encontrar el valor de dicho factor.

El análisis dinámico debe hacerse para estructuras cuya esbeltez o dimensiones reducidas las hace especialmente sensibles a las ráfagas de corta duración, y cuyos períodos naturales largos favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes. Son de este tipo de estructuras torres atirantadas para líneas de transmisión, antenas, tanques elevados, anuncios y en general estructuras que -

presentan una dimensión muy corta paralela a la dirección del viento.

### I. 5. 3.- VIBRACIONES TRANSVERSALES AL FLUJO.

Estas vibraciones son causadas por vórtices alternantes transversales al flujo. Las perturbaciones que algunos cuerpos ocasionan en el flujo del aire se manifiestan en forma de vórtices que se generan periódicamente y que viajan a lo largo de la estela turbulenta, causando empujes dinámicos. El caso más típico es el que se presenta cuando el viento incide normalmente al eje de un cuerpo -- prismático o cilíndrico, entonces se producen remolinos o vórtices cilíndricos, con eje paralelo al del cuerpo y que se desprenden alternadamente a cada lado -- del mismo. Sus ejes se desplazan a lo largo de la estela, presentando sentidos opuestos de giro, según se trate de vórtices a uno u otro costado del obstáculo, (Fig. I.5.2.).

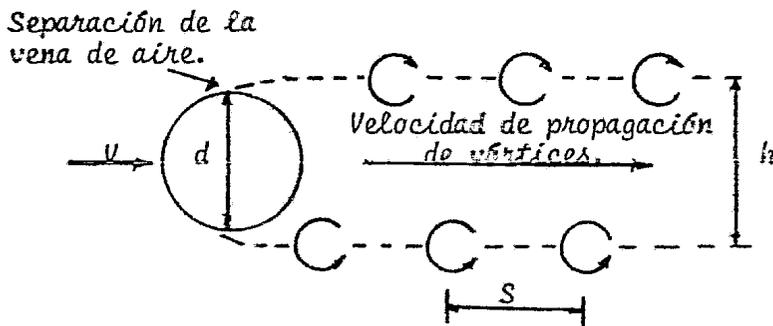


Fig. I.5.2- Vórtices de Von Karman.

El resultado de esta perturbación es la generación de fuerzas periódicas de sentido alternante, que actúan transversalmente sobre el cuerpo.

Este fenómeno ha sido causa de vibraciones excesivas de chimeneas con períodos naturales próximos a los de vorticidad y se ha reconocido como uno de los factores que intervinieron en el colapso del puente colgante "Tacoma Narrows."

En este grupo se incluyen estructuras aproximadamente cilíndricas, tales como chimeneas, cables en líneas de transmisión, puentes y tuberías colgantes, etc.

#### I. 5. 4.- PROBLEMAS ESPECIALES.

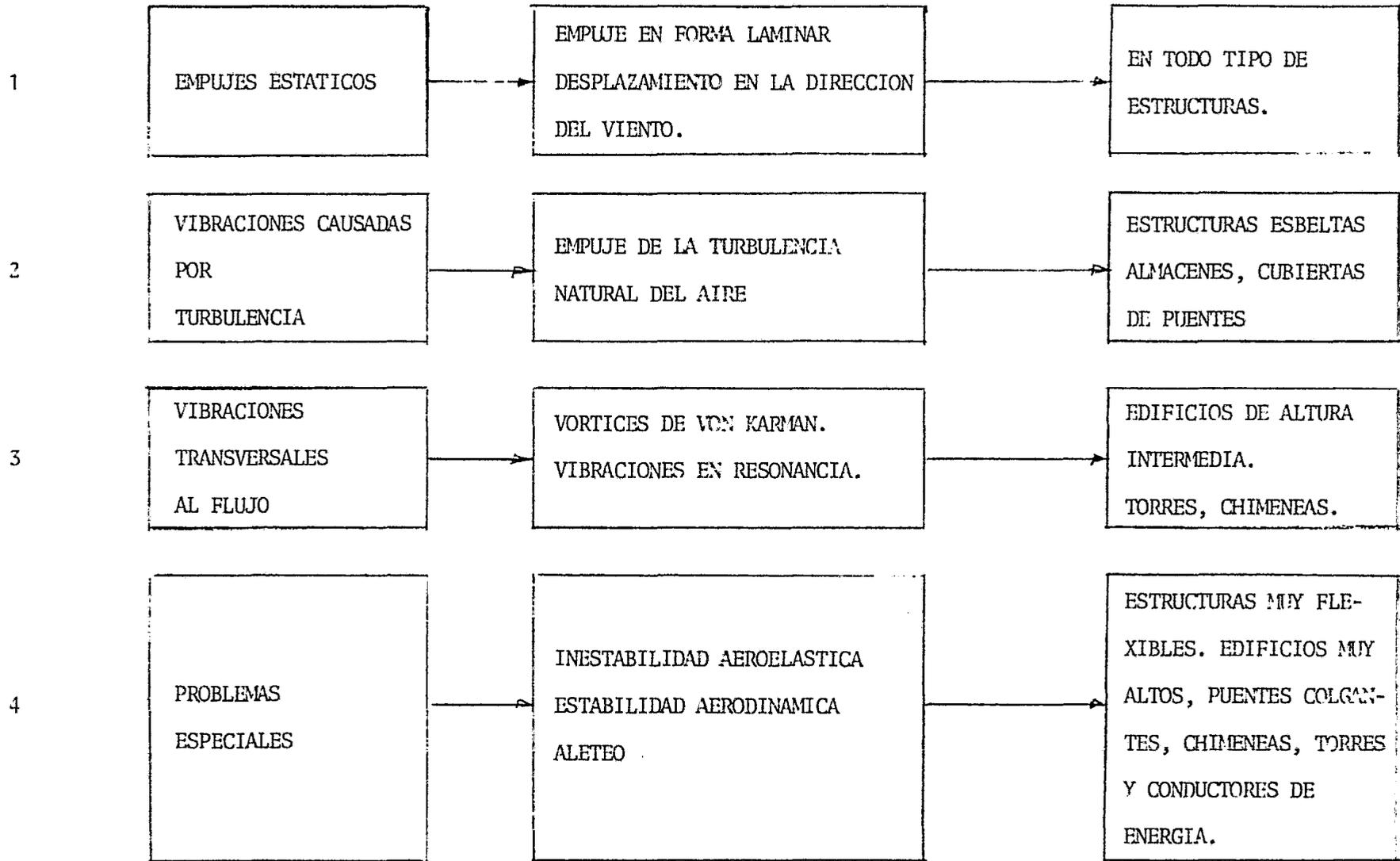
Uno de los problemas que se puede presentar es la inestabilidad aeroelástica. Al actuar el viento sobre una estructura ocasiona desplazamientos en la misma, -- tanto en la dirección del viento como normalmente al mismo. La velocidad relativa entre el viento y la estructura varía en magnitud y dirección como función del -- tiempo, alternándose el ángulo de incidencia. Para ciertas formas de cuerpos y -- ciertas direcciones de viento puede ocurrir que, actuando con un nuevo ángulo de -- incidencia, el viento ocasione fuerzas o desplazamientos mayores en la dirección -- transversal, que ésto dé lugar a nuevos cambios en el ángulo de incidencia y que el fenómeno continúe hasta alcanzarse deformaciones excesivas y eventualmente el -- colapso de la estructura. Estos problemas pueden presentarse por ejemplo, en ca- bles de líneas de transmisión o en antenas parabólicas de torres de micro ondas. Las pruebas en túnel de viento, para distintos ángulos de incidencia, permiten es- tablecer que una forma dada puede ofrecer problemas de estabilidad aerodinámica.

Otro fenómeno importante que puede ocasionar vibraciones peligrosas de es- tructuras flexibles es el designado como "aleteo" (flutter). Cuando el viento -- incide con un ángulo de ataque muy bajo sobre grandes áreas planas o de muy baja curvatura, puede excitar simultáneamente vibraciones simétricas y antisimétricas, o bien vibraciones de flexión y de torsión.

Las deformaciones correspondientes a un modo de vibración aumentan los efec- tos del viento sobre el otro. Si dichos modos tienen períodos próximos entre sí, se acoplan y la magnitud aumenta ciclo tras ciclo. El fenómeno es típico de su- biertas colgantes con curvatura pequeña y de puentes colgantes.

A continuación se presenta un cuadro en el que podemos resumir todos los -- efectos que causa el viento y a que tipo de estructuras afecta.

CUADRO RESUMEN DE LOS EFECTOS DEL VIENTO



## REFERENCIAS:

1. "Discorsi a Due Nuove Scienze" por Galileo, Bologna, 1625.
2. "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica", por Sir Issac Newton, 1687.
3. "Aerodynamics & the Civil Engineer", por W.W. Pagon, Engineering News-Record, Vol. 112, 1934, pag. 348; Vol. 113, 1934, pags. 41, 456,814; Vol. 114, 1935, pags. 582, 665, 742; Vol. 115, 1935, pag. 601.
4. "Recherches Experimentales sur les Lois de la Resistance des Fluides", por N.V. Duchemein, Memorial de l'Artillerie, Vol. 5, 1842, Pag. 65.
5. "An Experimental Investigation Concerning the Natural Powers of Water and Wind", por John Smeaton, Philosophical Transactions, Royal Soc., 1759.

## CAPITULO II

### VELOCIDADES DE VIENTO

II. 1.- REGISTROS DE VELOCIDADES DE VIENTO

II. 2.- REGISTROS DE VELOCIDADES DE VIENTO EN  
MEXICO

II. 3.- VARIACION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO  
CON LA ALTURA

## II. 1.- REGISTROS DE VELOCIDADES DE VIENTO.

El viento es parte de la circulación general de la atmósfera y puede ser definido como el movimiento del aire producido por la acción de la gravedad en masas de aire de diferente densidad y por fuerzas desviadoras debidas a la rotación de la tierra. Además, influyen la rugosidad de la superficie, la viscosidad del aire como también los gradientes de presión y temperatura.

El viento posee energía cinética en virtud de la velocidad y masa de aire en movimiento. Si un obstáculo es colocado en la trayectoria del viento, el aire es detenido o desviado de su trayectoria, entonces toda o parte de su energía cinética es transformada en energía potencial de presión.

La distribución de presión en cada punto del obstáculo depende de la velocidad del flujo del aire, de la densidad del aire, de la forma del obstáculo, del ángulo de incidencia del viento y de la rigidez lateral del obstáculo.

La velocidad del viento no es constante aún a miles de metros sobre la superficie, debido a la fricción que existe con la superficie irregular del terreno. Cuando la rugosidad del terreno ya no interfiere con la velocidad del viento, ésta es conocida como velocidad gradiente.

El flujo del aire cercano a la superficie es turbulento, siendo esta turbulencia de carácter espacial. Las fluctuaciones de velocidad ocurren en tres direcciones: longitudinal, lateral y vertical. Las principales fluctuaciones ocurren en la dirección longitudinal que es también la dirección promedio del viento. Las características de estas fluctuaciones (amplitud, frecuencia, etc.) dependen principalmente de la densidad de las obstrucciones en el terreno. En la figura II.1.7 se observa como varía la velocidad del viento en relación a la rugosidad del terreno, siendo medida -en los dos casos- a la misma altura. En el primer registro se observan amplitudes y frecuencias menores que en el segundo, y la velocidad es más alta.

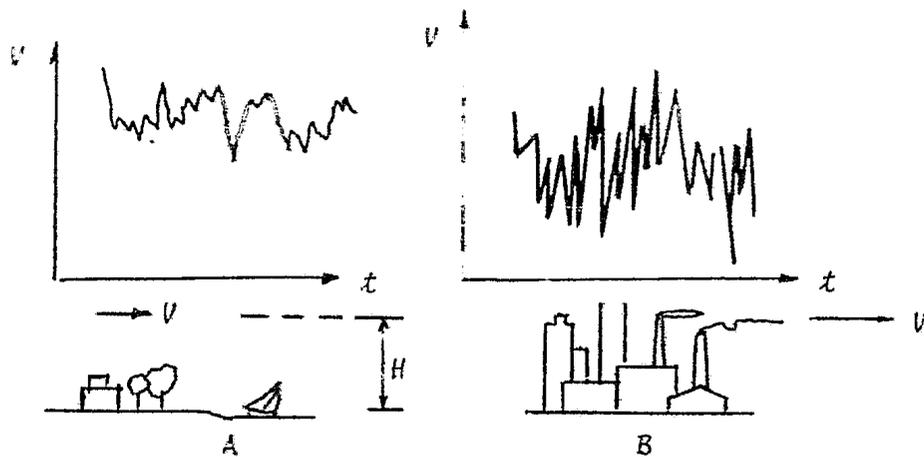


Fig. II.1.1.- Variación de la velocidad del viento sobre terrenos de diferentes rugosidades.

La figura II.1.2. presenta un registro de velocidades hecho para tres diferentes alturas. Se puede notar que la velocidad promedio aumenta con la altura sobre el terreno y que la intensidad de turbulencia disminuye con la altura.

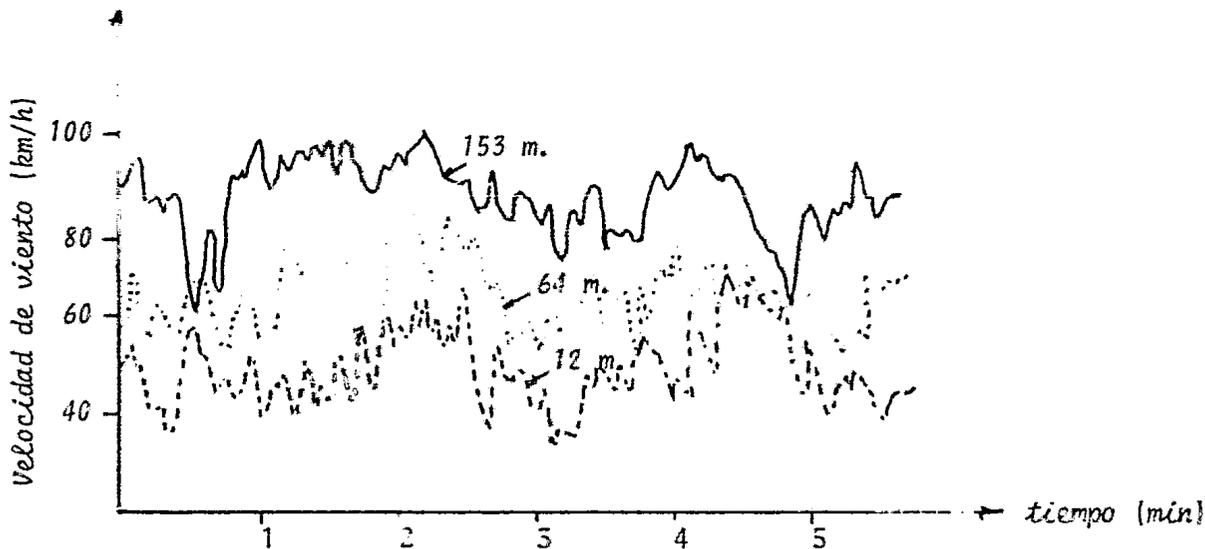


Fig. II.1.2.- Velocidad del viento en tres diferentes alturas de un poste de 153 m.

La velocidad del viento se puede dividir en dos componentes: la velocidad promedio del viento conocida como la componente estática y la velocidad instantánea conocida como la componente dinámica. Para conocer la componente dinámica es necesario recurrir a la teoría de la probabilidad y asociar la velocidad máxima con una probabilidad de ocurrencia.

colocados en áreas abiertas libres de obstáculos. Los diferentes tipos de anemómetros pueden ser clasificados de acuerdo a su rango de frecuencia como:

- 1) Anemómetros de baja frecuencia con límites hasta de 0.1 Hz.
- 2) Anemómetros de baja frecuencia con límites en 20 Hz.
- 3) Anemómetros de alta frecuencia con mediciones hasta de 100 Hz.

## II. 2.- REGISTROS DE VELOCIDADES DE VIENTO EN MEXICO.

La determinación precisa y confiable de la velocidad del viento en nuestro país, es de fundamental importancia para el diseño estructural.

En una estructura la carga que produce el viento es proporcional al cuadrado de la velocidad del viento que incide en ella. De modo que aumentos en la -- velocidad en un 10%, 20% y 30% resultan en aumentos de un 21%, 44% y 69% en -- las cargas respectivas. Esto señala la importancia que tiene la determinación -- adecuada de la magnitud de la velocidad máxima del viento que se emplea en el di -- seño estructural.

Además es importante asociar los valores máximos de la velocidad del viento con niveles de probabilidad o períodos de recurrencia que permitan la evaluación de los riesgos aceptados y por consiguiente la determinación de grados de confiabilidad.

En los últimos 20 años se han realizado en nuestro país investigaciones encaminadas a determinar estadísticamente los movimientos intensos del aire sobre la superficie. De aquí se han obtenido herramientas prácticas para determinar la acción del viento en las estructuras, las cuales han sido incorporadas a las normas de diseño.

En México, considerando los requisitos de la información del viento, como son: número de sitios, años de antigüedad, precisión y continuidad de la medición, se cuenta con las siguientes fuentes:

a) Servicio Meteorológico Nacional.

Este servicio tiene actualmente a su cargo más de 90 observatorios meteorológicos, donde se recaba información del viento. Se puede decir que la información de dichos sitios llena los requisitos mínimos aceptables para ser tomados en cuenta.

b) Secretaría de la Defensa Nacional y Secretaría de Marina.

Estas dos secretarías cuentan con sistemas de medición del viento, pero generalmente no se registra de manera continua y homogénea.

c) Universidad Nacional Autónoma de México.

Algunas dependencias de la UNAM como son: el Instituto de Ingeniería, el Instituto de Investigación en Matemáticas Aplicadas y Sistemas, y el Centro de Ciencias de la Atmósfera, cuentan con registros continuos del movimiento del aire fundamentalmente en el Valle de México. Sin embargo, estos registros sólo han sido tomados durante muy pocos años, por lo que no cubren los requisitos necesarios para ser tomados en cuenta.

d) Servicios de Navegación del Espacio Aéreo Mexicano.

Este organismo cuenta con anemómetros en los principales aeropuertos del país. Estos aparatos sólo son utilizados para indicar la velocidad y dirección del viento cuando aterriza o despega un avión; por esta razón no se pueden tomar en cuenta, ya que no proporcionan los valores máximos.

e) Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

El Atlas del Agua es una publicación que editó en 1976 la SARH, en donde se muestra información meteorológica recopilada y procesada hasta esa fecha. Se muestran en esa publicación los vientos máximos registrados por los observatorios del SMN. También se señalan las trayectorias de huracanes en ambos litorales.

Sin embargo, debido al número reducido de sitios de medición, localizados principalmente en ciudades y cuyas condiciones topográficas y obstáculos de sus alrededores presentan enormes variaciones de un sitio a otro, las investigaciones realizadas hasta la fecha presentan limitaciones en la precisión de sus resultados.

Además de esto, en el caso de la medición en zonas costeras, otra limitación es que los registros nos dan información tanto de vientos de huracán como de vientos que no lo son, cuyas características y orígenes meteorológicos son diferentes.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), actualmente realiza un proyecto de investigación para la Comisión Federal de Electricidad, que en una de sus etapas contempla mejorar la confiabilidad en la estimación de las velocidades máximas del viento en México.

Dado que el Servicio Meteorológico Nacional es la fuente más importante de información útil para la estimación de los vientos máximos, el Instituto de Investigaciones Eléctricas, realizó un análisis detallado de los datos de viento recopilados en el SMN, que incluye la visita a 62 observatorios meteorológicos. La información de topografía aledaña, historia y condiciones de operación de los observatorios visitados, aunada a la revisión exhaustiva de los libros y bitácoras de los últimos 40 años, hacen posible la evaluación de la veracidad de los datos proporcionados. La información de topografía y altura de los anemómetros también hace posible una zonificación que a diferencia de otras, no es afectada por estos factores y es por consiguiente más homogénea, confiable y apegada a la realidad. También, por primera vez, se separa la información relativa a vientos huracanados, de la información restante.

Para tener un conocimiento completo de la información archivada en los registros de los observatorios, el proyecto analizó los archivos de la Dirección del SMN, en Tacubaya, D.F., desde 1940 hasta 1973. Este análisis abarca la información de 75 observatorios, con un total de 23,096 meses de observación. De este análisis se seleccionaron 60 observatorios, que llenan los requisitos mínimos necesarios exceptuando únicamente la homogeneidad.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas después de haber recopilado y seleccionado la información disponible hasta la fecha, obtuvo los siguientes datos:

a) Información procesada de datos meteorológicos diarios de 1970 a 1975, de todo el país.

- b) Información de vientos máximos mensuales de 1941 a 1970, de todo el país, copiado de los libros.
- c) Información de vientos máximos mensuales de 1976 a la fecha, de todo el país.
- d) Características de topografía local, incluyendo cambios en los obstáculos y en la ubicación de los observatorios, a través de los años de registro.
- e) Métodos de medición, equipos utilizados y características de la instalación.
- f) Información sobre mantenimiento de equipos, cambios de personal y otros, que permitieron la evaluación de los datos recabados.

Actualmente se llevan a cabo investigaciones complementarias dentro del mismo proyecto, encaminadas a considerar los diferentes tipos de terrenos y su influencia en la velocidad del viento y la variación en el tiempo de la velocidad del viento, lo que permitirá realizar una zonificación de la República Mexicana, que aunada a factores de topografía y ráfagas, permita a su vez determinar la velocidad del viento en cualquier sitio.

## II. 3.- VARIACION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO CON LA ALTURA.

Los principales factores que contribuyen a establecer el flujo del aire sobre la superficie de la tierra son: la densidad del aire, la posición geográfica del sitio en el que se trata de determinar la velocidad, la curvatura de la superficie terrestre, el gradiente de temperatura y la rugosidad de la tierra.

Desde hace muchos años se han tratado de encontrar las expresiones que relacionen todos estos factores y que sirvan para definir con precisión la velocidad del viento sobre una zona de la tierra.

Existen dos regiones sobre la superficie de la tierra en las cuales la velocidad es diferente. Una región, la más cercana a la superficie de la tierra, resulta afectada de manera notable por la rugosidad del terreno haciendo que el flujo del viento no sea uniforme. Al perfil de la velocidad dentro de esta zona se le denomina "capa límite". La otra región es aquella en donde la rugosidad del

La figura II.1.3. muestra gráficamente un registro típico de velocidades de viento con la velocidad máxima asociada a una probabilidad de excedencia.

La velocidad máxima del viento es:

$$V_m = \bar{v} + \sigma$$

en donde la velocidad media ( $\bar{v}$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ) dependen del intervalo promedio de tiempo adoptado para la determinación de la velocidad media.

La cantidad  $I = \frac{\sigma}{\bar{v}}$

es conocida como la intensidad de turbulencia. Si el tiempo promedio es igual a una hora, para un intervalo de altura de 0 a 60 m. sobre el terreno, el valor típico de  $I$  se encuentra en el rango de 0.1 a 0.3, correspondientes a terrenos -- abiertos y áreas urbanas respectivamente.

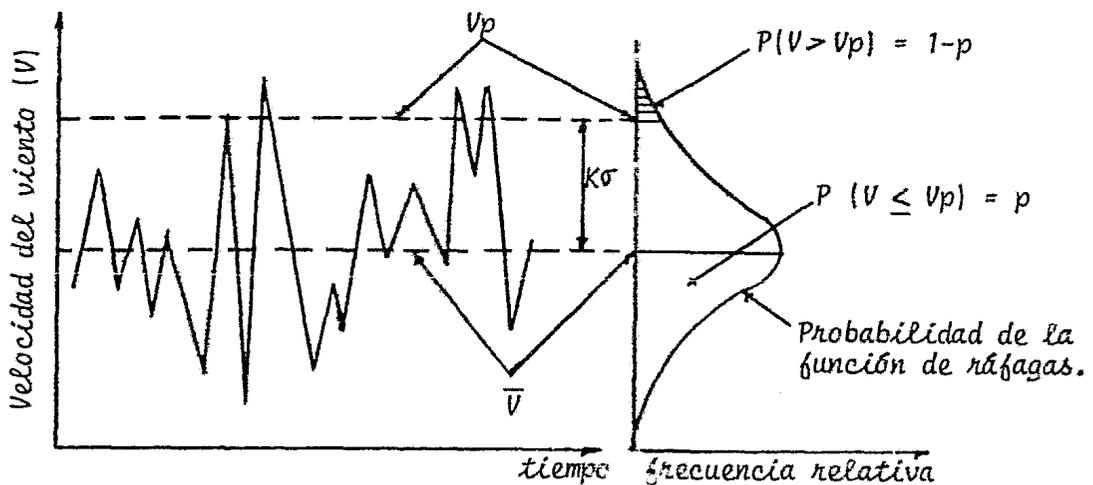


Fig. II.1.3.- Probabilidad de la función de ráfagas.

La medición de velocidades de viento tiene dos aspectos: el primero referente a la componente de baja frecuencia correspondiente a la velocidad media y el segundo referente a la medición del componente de alta frecuencia debido a la turbulencia y que corresponde a las velocidades de ráfagas de viento.

Generalmente las velocidades de viento se registran en anemómetros colocados en áreas abiertas libres de obstáculos. Los diferentes tipos de anemómetros --

terreno ya no es importante y la velocidad se puede considerar prácticamente uniforme. Para fines de ingeniería civil, es necesario conocer la variación de la velocidad dentro de la "capa límite".

Prandtl<sup>1</sup> efectuó experimentos en túnel de viento, encontrando la variación de la velocidad con la altura en los tres tipos de flujo, (turbulento, laminar y transición). Dentro del flujo turbulento y laminar la velocidad varía de una manera uniforme, relativamente fácil de determinar (Fig. II.3.1.). Para el flujo en transición la velocidad varía de una manera irregular.

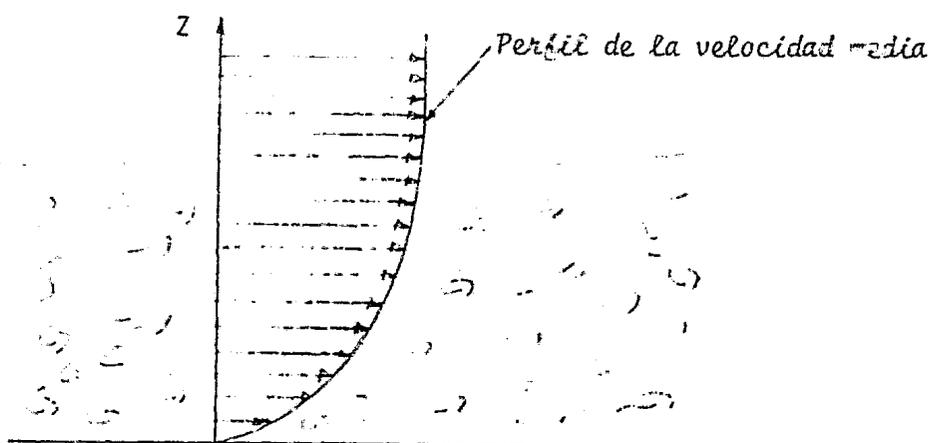


Fig. II.3.1.- Perfil de la velocidad dentro del flujo turbulento.

Quando se trata de ciudades el flujo generalmente es turbulento, por lo que se puede considerar un perfil como el mostrado en la figura II.3.1.

En el perfil de la velocidad, la intensidad del viento es menor y el flujo del aire es turbulento a menores alturas, debido a la fricción que existe con la rugosidad del terreno. (Fig. II.3.2.).

A cierta altura llamada "altura gradiente ( $H_G$ )", la influencia de la fricción es imperceptible, y a la velocidad del viento en ese punto se le denomina "velocidad gradiente" ( $V_G$ ).

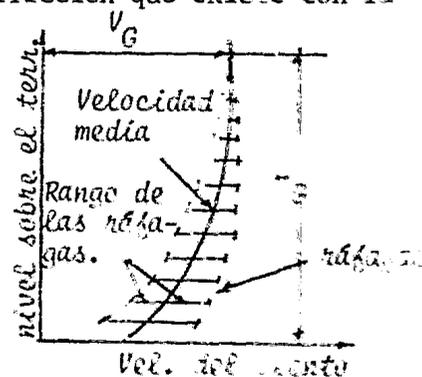


Fig. II.3.2.- Perfil de la velocidad media.

Hasta la fecha casi todos los países aceptan que la velocidad varía con la altura de acuerdo a una ley exponencial originalmente propuesta por Davenport<sup>2</sup>. El concepto de la ley exponencial se encuentra en la expresión:

$$V_H = V_G \left( \frac{H}{H_G} \right)^\alpha$$

en donde  $V_H$  es la velocidad del viento a la altura H sobre el terreno.

El valor del exponente  $\alpha$  depende del tipo de topografía del lugar. Sólo se han dado valores para superficies representativas muy generalizadas. La Tabla - II.3.1. muestra los valores de  $\alpha$  y los valores de la altura gradiente para las diferentes categorías de terrenos. La figura II.3.3. muestra el perfil de la velocidad de viento en relación al tipo de terreno sugerido por Davenport.

TABLA II.3.1.- Influencia de la rugosidad de la superficie en relación al viento en estructuras cercanas a la superficie.

TIPO DE TERRENO	$\alpha$	ALTURA GRADIENTE	COEFICIENTE DE ARRASTRE: K
a. Terrenos abiertos con pocos obstáculos, terrenos con pastos o agrícolas con pocos árboles, praderas, costas, islas, lagos, interiores, desiertos.	0.16	900	0.005
b. Terrenos uniformemente cubiertos con obstáculos de 30-50 pies de altura: suburbios residenciales, pequeños pueblos, bosques, pequeños campos por árboles y arbustos.	0.28	1300	0.015
c. Terrenos con grandes e irregulares objetos. Centros de grandes ciudades, campos con árboles muy grandes, etc.	0.40	1700	0.050

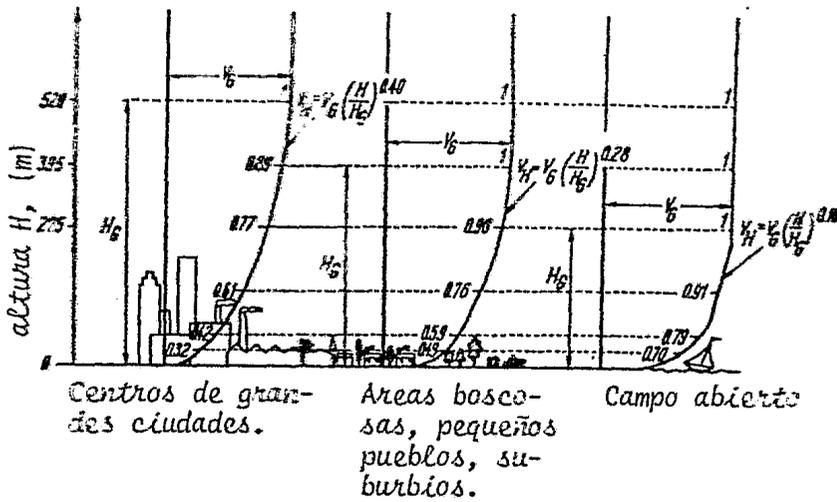


Fig. II.3.3.- Perfiles de velocidades de viento sugeridos por Davenport.

Existe una variante de la expresión de Davenport, la cual es la forma clásica de tratar el problema. En lugar del parámetro de gradiente  $V_G$  y  $H_G$ , el método clásico utiliza el parámetro  $V_{10}$ , que es la velocidad registrada a 10 m. de altura (altura usual de los anemómetros). La expresión entonces es:

$$V_H = V_{10} \left( \frac{H}{H_{10}} \right)^{\alpha}$$

Existe otra expresión exponencial, la cual ha surgido en base a los conceptos de G.I. Taylor y de O.A. Sutton<sup>3</sup>, en los que se reconoce que los remolinos y ráfagas no son una serie de impulsos independientes, sino que son una sucesión de movimientos continuamente interconectados. La expresión tiene la siguiente

forma:

$$\bar{u} = u_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\frac{n}{2-n}}$$

en donde  $u_0$  es la velocidad conocida a la altura  $z_0$  y  $\bar{u}$  es la variación de la velocidad promedio sobre un punto de la superficie. El valor de  $n$  está comprendido entre 0 y 1. Cuando  $n=0$ , o sea cuando no existe turbulencia:

$$\bar{u} = u_0$$

mientras que para turbulencia máxima,  $n = 1$ :

$$\bar{u} = u_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^n$$

que establece la región en la cual pueden encontrarse leyes de variación para la velocidad (Fig. II.3.4.)

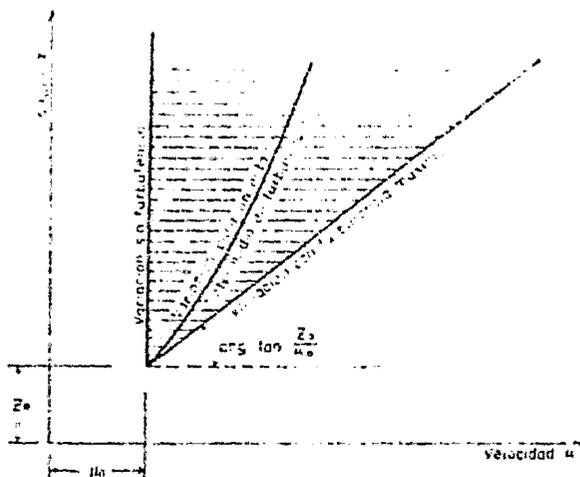


Fig. II.3.4.- Región en la cual pueden encontrarse leyes de variación para la velocidad.

Un trabajo realizado por R.H. Sherlock<sup>4</sup> propone la expresión:

$$\bar{u} = u_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^{1/6}$$

o sea que considera  $n = 2/7$ . En este trabajo aparecen también los resultados obtenidos en el laboratorio de Brookhaven<sup>5</sup>, en donde, a partir de los resultados experimentales, se propone que el exponente teórico de Sherlock sea modificado a  $1/4$  que correspondería a un valor de  $n = 2/5$ . G.F. Collins<sup>6</sup>, realizando pruebas en Handford, en octubre de 1950, propone un valor para  $n = 1 / 2.8$ , el cual se aproxima bastante a las mediciones realizadas.

En base a los valores propuestos y las mediciones realizadas en México, el Reglamento de 1960 tomó como valor  $n = 1/3$ , considerando que este valor es satisfactorio solo para terrenos relativamente planos y no puede tomarse como universal, debido a la diversidad de condiciones climatológicas. La figura II.3.5. -- muestra una comparación de distintas variaciones de la velocidad propuestas por diferentes autores, utilizando la misma velocidad básica de diseño de 78 km/h.



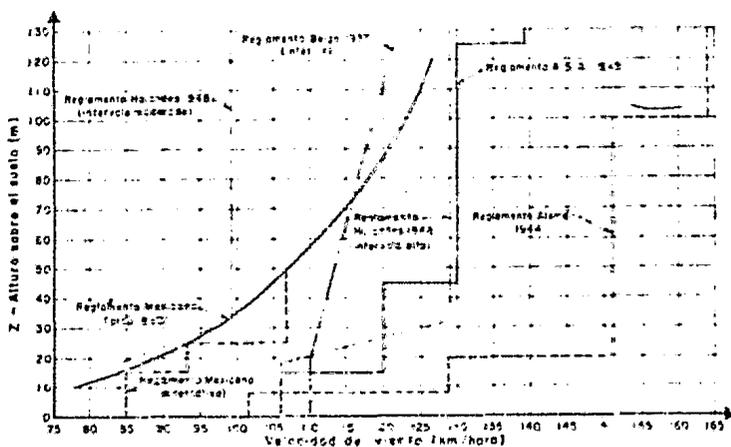


Fig. II.3.6.- Variación de la velocidad del viento con la altura según diferentes reglamentos.

La mayoría de los países aceptan leyes de variación del viento con la altura de tipo exponencial. El problema se reduce a la determinación del valor del exponente. El Reglamento mexicano adopta el valor del exponente igual a 0.33 -- (  $n=1/2$  ). El Reglamento de 1960 indicaba un valor de 0.20 ( $n=1/3$ ), el cual parece ser el más indicado pues el valor de 0.33 nos conduce a presiones de viento - exageradas. Se llevaron a cabo mediciones en el edificio Prisma de la Lotería - Nacional y los resultados son bastante semejantes a los encontrados con la teoría exponencial con un valor de 0.2. En la actualidad investigaciones hechas en el Instituto de Ingeniería de la UNAM demuestran que el valor de 0.33 es muy -- grande y que podría reducirse.

Existe otra teoría de tipo logarítmico originalmente sugerida por Kolmogorov<sup>8</sup>, la cual se ha ido desarrollando hasta tener la siguiente expresión:

$$V = \bar{V}(z) = 2.5 V_0 \ln \left( \frac{z - z_d}{z_0} \right)$$

en donde:

V: velocidad referida a una altura, generalmente 10 m., que es la altura a la que se hacen las mediciones.

Zd: valor relativo a la altura promedio de los edificios en los centros de ciudades. Se recomienda que Zd sea cero excepto en el centro de grandes ciudades donde se puede valorar como  $Zd = 0.75h$ , donde h es la altura promedio de los

edificios de alrededor.

2.- valor referido a la altura sobre el terreno donde se conoce la velocidad  $V$ .

Sin embargo, ésta teoría no ha sido apoyada y en la actualidad casi no es utilizada.

#### REFERENCIAS

- 1.- "Applied Hydro- and Aeromechanics", por Prandtl, L., Tietjens, O.G., Transactions, McGraw-Hill Book, Co. Inc., New York, 1934.
- 2.- "The Relationship of Wind Structure to Wind Loading", por Davenport, A.G., Wind Effects on Buildings and Structures, Proceedings of the Conference held at the National Physical Laboratory, Teddington, London, 1965.
- 3.- "Difussion by continuous movements", por Taylor G.I., Proceedings of the Royal Society of London. Vol. 215, 1915.  
"Wind Structure and evaporation in a turbulent atmosphere", por Sutton, O.G., Proceedings of the Royal Society of London, Vol. 148, 1938.
- 4.- "Variation of wind velocity and gusts with height", por Sherlock, R.H., Proceedings of the A.S.C.E., Vol. 78, N° 126, 1952.
- 5.- "Discussion to an article by Sherlock", por Pagon, W.W., Transactions of the A.S.C.E. Vol. 718, 1953.
- 6.- "Determining basic wind loads", por Collins, F.G., Proceedings A.S.C.E., Vol. 81, N° 825, 1955.
- 7.- "Dissipation of energy in locally isotropic turbulence", por Kolmogoroff, A.N., Comp. rend. acad. sci. URSS, 31 (1941), 538-540, 32 (1941), 16.
- 8.- American Standard Association (desde 1960 ANSI, American National Standard Institute).

## CAPITULO III

### AREA EXPUESTA AL VIENTO

III. 1.- PRESION DEL VIENTO EN LA ESTRUCTURA

III. 2.- COEFICIENTES DE EMPUJE SEGUN LA A.S.C.E.

III. 3.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DE COEFICIENTES DE  
EMPUJE EN TORRES TUBULARES DE ACERO  
DE SECCION CUADRADA

### III. 1.- PRESION DEL VIENTO EN LA ESTRUCTURA.

Si un objeto se interpone a la corriente del viento, es necesario que la corriente cambie de dirección y de velocidad para poder pasar el objeto. Para un fluido ideal, por el principio de Bernoulli:

$$1/2 \rho V_0^2 + P_0 = 1/2 \rho V^2 + P$$

en donde:

$V_0$  es la velocidad con que se aproxima la corriente de aire,

$P_0$  es la presión estática de la corriente de aire

$P$  es la presión estática en contacto con el objeto.

$1/2 \rho V^2$  es la presión dinámica en algún punto del objeto.

La suma de las presiones estática y dinámica, es constante en todos los puntos, por lo que, si la presión dinámica disminuye, la presión estática aumenta en la misma magnitud y viceversa. Cuando la presión dinámica es cero -como en el centro de la cara frontal de una placa,- el incremento de la presión estática es igual a la presión dinámica en un punto de la corriente antes de chocar con la -- placa.

En las aristas de las placas, la velocidad de la corriente aumenta y se desarrolla una presión negativa (menor que la presión atmosférica); estos cambios de presión producen una fuerza en el objeto. También se generan fuerzas adicionales de fricción, pero, para casos estructurales son generalmente pequeñas.

La fuerza que produce el cambio de presión, se descompone en dos elementos y se utilizan coeficientes dimensionales para definir la magnitud de esta fuerza:

$$\text{Empuje longitudinal (fuerza paralela al viento)} = C_D q A$$

$$\text{Empuje transversal (fuerza normal al viento)} = C_L q A$$

en donde:

$$q = 1/2 \rho V^2$$

siendo:

$V$  la velocidad del viento.

$\rho$  la densidad del aire

$A$  el área expuesta al viento

$C_D$  y  $C_L$  los coeficientes de empuje longitudinal y transversal respectivamente.

El problema en la expresión que nos da la fuerza está en determinar el valor de los coeficientes de empuje de manera que sean realmente representativos de la estructura en particular. Generalmente utilizaremos los valores que encontramos en tablas (los Reglamentos tanto del Distrito Federal como el de la Comisión Federal de Electricidad dan estas tablas). Sin embargo, en estructuras muy altas, -- con secciones especiales, se deberían efectuar pruebas con un modelo en un túnel de viento. En realidad resulta muy difícil y muy costoso hacer pruebas en túnel de viento por lo que en nuestro país, en la mayoría de los casos, lo que se hace es buscar valores representativos de nuestra estructura hasta donde sea posible -- aunque, obviamente, ésto resultará en presiones diferentes a las reales.

El viento no siempre incide en la estructura perpendicularmente, por lo que el área expuesta puede variar dependiendo de dicho ángulo de incidencia.

Cualquier estructura se analiza suponiendo que el viento puede actuar en -- dos direcciones perpendiculares entre sí. Se deben elegir las direcciones más desfavorables para la estabilidad de la estructura. Ya determinada la dirección más desfavorable del viento, se proyecta el área en un plano vertical, perpendicular a la dirección del viento; el área proyectada es el área que tomaremos como expuesta al viento (Fig. III.1.1.).

En el caso de armaduras, el Reglamento del Distrito Federal indica que debemos tomar como área expuesta al viento la suma de todas las áreas de los miembros de la armadura proyectados en un plano vertical. El Manual de la Comisión Federal de Electricidad indica un valor igual al área total encerrada por la estructura multiplicado por 0.2.

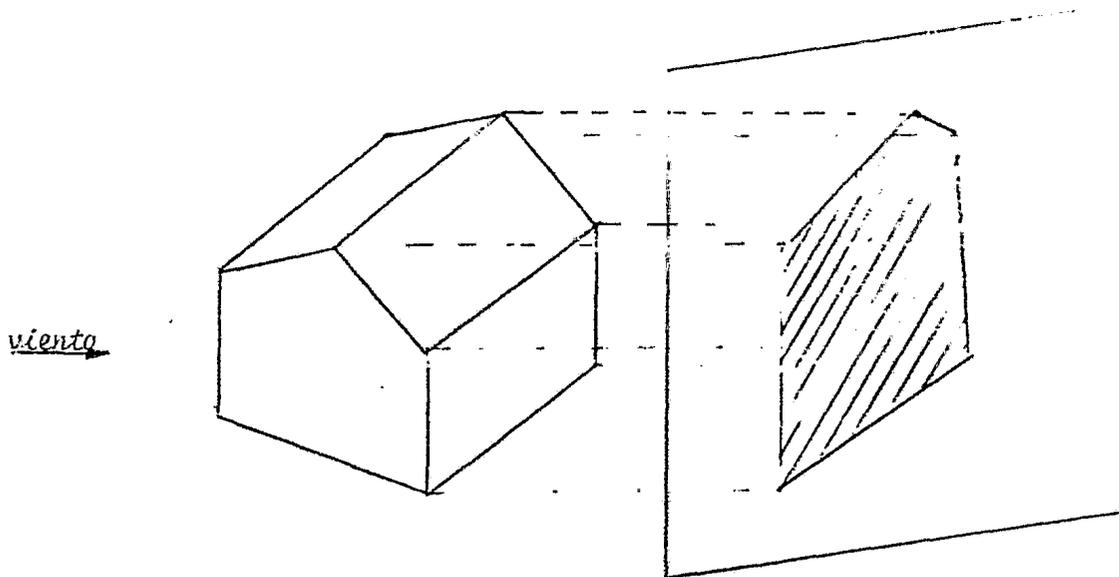


Fig. III.1.1.- Area expuesta al viento.

### III. 2.- COEFICIENTES DE EMPUJE SEGUN LA A.S.C.E.

La A.S.C.E. propone valores para los coeficientes de empuje de acuerdo a los siguientes factores:

- a) La forma geométrica del objeto.
- b) La orientación de la corriente del viento.
- c) Los efectos de fricción y
- d) El tamaño del objeto.

#### a) La forma geométrica del objeto.

Si una placa rectangular delgada (Fig. III.2.1a.) es infinitamente larga, -- esto es, la relación de aspecto (definida como la relación de largo  $L$ , al ancho  $b$ ,  $\lambda = L/b$ ), es infinita, el viento solamente puede escapar por los bordes. La figura muestra la distribución de presiones y la suma de presiones en las dos caras es igual al empuje total. Para una placa cuadrada, esto es  $\lambda = 1$ , el viento puede escapar por los 4 lados, creando succión en la parte posterior. Para una placa circular, el flujo del aire es uniforme alrededor de la periferia, consecuentemente el coeficiente de empuje se reduce.

Cuando una placa rectangular se coloca sobre el terreno (Fig. III.2.1b.), el

aire no puede correr a lo largo de la parte inferior de la placa. Esto tiene un pequeño efecto en las presiones de la cara frontal y reduce considerablemente la succión en la parte posterior, especialmente en el caso de placas grandes; el coeficiente de empuje es cercano al de una placa cuadrada libremente suspendida.

En todos los casos la succión en la parte posterior es el factor más importante en el empuje total. Cuando, por alguna razón, la succión se reduce, el efecto en el empuje es apreciable. Por ejemplo, consideremos el paralelepípedo mostrado en la figura III.2.1c.: como el ancho  $b$  es relativamente grande con relación a la altura, el coeficiente de empuje disminuye. La variación del coeficiente de empuje con la relación de aspecto se muestra en la Tabla III.2.1.

Si la placa está perforada, el empuje es función de la relación de solidez  $\phi$ , que es la relación del área sólida con el área total encerrada.

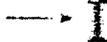
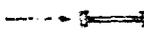
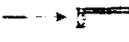
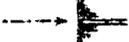
Cuando dos placas o formas "reticulares" se colocan paralelamente, la placa de sotavento es "escudada" por la placa de barlovento. Cuando el espacio que las separa es infinito, es evidente que es el caso de dos placas separadas. El grado de "escudamiento" es función del espacio entre las estructuras, la relación de solidez y el ángulo de incidencia (horizontal, vertical o ambos).

Los coeficientes de empuje longitudinal y transversal para varias formas típicas estructurales, se dan en la Tabla III.2.2.

TABLA III.2.1. COEFICIENTES DE EMPUJE.

	a) Placa plana con viento normal								b) Placa rectangular sobre el terreno.			c) Paralelepípedo.		
	Valor de $\lambda$											Valor de $v/h$		
	1.0	2.0	5.0	10	20	40	$\infty$	1.0	10	$\infty$	0.5	1.0	6.0	
Presión	0.76							0.60	0.38		0.60			
Succión	0.36							1.38	0.72		0.60			
Valor de $C_D$	1.12	1.19	1.20	1.27	1.42	1.66	1.98	1.10	1.20	1.20	1.25	1.05	0.9	

TABLA III.2.2.- COEFICIENTES DE EMPUJE PARA FORMAS ESTRUCTURALES.

Perfil y dirección del viento.	$C_D$	$C_L$
	203	0
	196 201	0
	204	0
	181	0
	20	03
	183	207
	199	-009
	162	-048
	201	0
	199	-119
	219	0

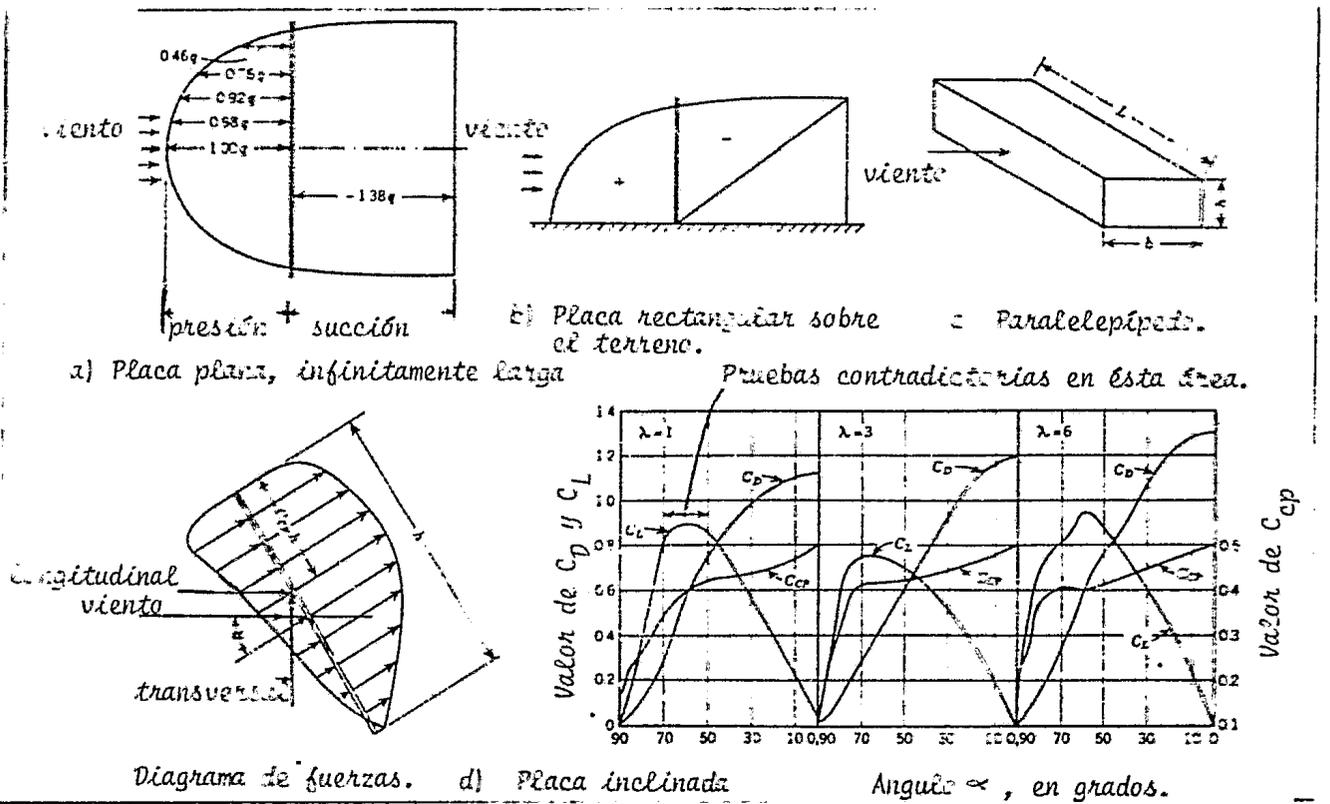


Fig. III.2.1.- Presión del viento en cuerpos elementales.

b) Orientación del objeto con la corriente del viento.

En general el viento no incide en el objeto de manera perpendicular a cualquiera de sus ejes. Aún para la parte cercana al terreno, el viento puede tener un ángulo vertical de incidencia, que generalmente será menor de  $20^\circ$ . El ángulo horizontal puede ser de cualquier valor.

La figura III.2.1d muestra una placa inclinada con la dirección del viento y los valores del coeficiente de empuje para relaciones de aspecto de 1,3 y 6. La distribución de presiones en las dos caras es, seguramente, no uniforme y el centro de presiones no es el centroide de la placa.

c) Fuerzas de fricción.

En los ejemplos dados anteriormente, las fuerzas son un resultado de la superficie de presión. Fuerzas adicionales resultan de la fricción entre el aire y el objeto expuesto. Obviamente, ésta fricción varía con la rugosidad de la

superficie del cuerpo, pero para la mayor parte de las estructuras de ingeniería civil, esto es de menor consecuencia que la forma del objeto, por lo que es posible considerar solamente el efecto del Número de Reynolds (R).

El Número de Reynolds es la relación de la fuerza inercial con las fuerzas viscosas que un fluido ejerce en un objeto. La fuerza inercial es el producto de la presión dinámica con el área, y la fuerza viscosa es la fricción entre el fluido y el objeto. Tenemos entonces:

$$R = \frac{\rho V^2 / h}{\mu V / h^2} = \frac{Vh}{\mu / \rho} = \frac{Vh}{\nu}$$

en donde:

R es el Número de Reynolds.

V es la velocidad del viento.

h es la dimensión característica del objeto.

$\rho$  es la densidad del aire.

$\mu$  es la viscosidad dinámica.

$\nu$  es la viscosidad cinemática.

La variación del coeficiente de empuje con R para algunos objetos elementales se da en la figura III.2.2. Algunos comentarios de la figura son:

- 1) Se carece de informaciones experimentales para valores de R mayores de  $10^6$ .
- 2) Los coeficientes de empuje para secciones cilíndricas muestran un decremento notable en el rango crítico del Número de Reynolds, cerca de  $0.5 \times 10^6$ .
- 3) No ocurre algo semejante en cuerpos poligonales como en puentes y edificios. Una excepción es la caída en los coeficientes para placas planas en el rango de  $R = 1,000$  a  $3,000$ .

#### d) Efecto del tamaño del objeto.

El mayor número de pruebas tienen que ser hechas en modelos comparativamente pequeños. Pagen<sup>1</sup> cita ejemplos en donde se tienen incrementos moderados en los

coeficientes de empuje al incrementar las dimensiones del objeto. Por ejemplo, para placas cuadradas grandes el valor de  $C_D$  es 1.28 en lugar de 1.12 como se muestra en la Tabla III.1.1. La diferencia es pequeña comparada con otras incertidumbres de las fuerzas de viento y puede deberse a resultados erróneos en los experimentos.

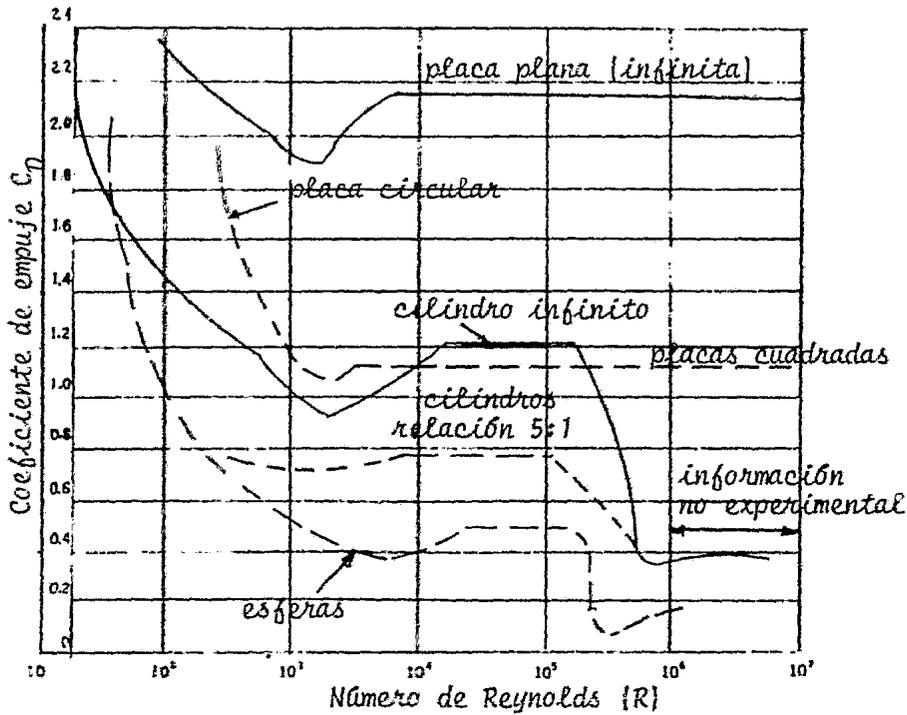


Fig. III.2.2.- Variación del coeficiente de empuje con R para algunos cuerpos elementales.

Armaduras:- El empuje en una armadura depende de la relación de aspecto de los miembros individuales. Para relaciones de solidez pequeñas (menores que 0.15), el coeficiente, basado en el área sólida, se aproxima a 2.0, porque, en este caso, los miembros de la armadura pueden ser largos y estrechos con flujos obstaculizados en los bordes, lo que implica una relación de aspecto infinita. Para relaciones de solidez grandes (mayores de 0.9) el coeficiente es aproximadamente el de una placa sólida con la misma relación de aspecto que la armadura que estamos considerando. Entre los dos extremos, el coeficiente es menor que 2.0, -- indicando algunas pruebas los valores de 1.6 y 1.7 para armaduras con relación -

de aspecto comunes.

Lo anterior se aplica a direcciones de viento perpendiculares a la armadura. Cuando la dirección se desvía de la normal, el empuje es más pequeño, aunque la diferencia no es importante para ángulos pequeños. Para propósitos de diseño normalmente se tomará el viento actuando perpendicularmente al área.

Pares de Armaduras.- Cuando dos elementos son colocados en línea, se produce un fenómeno denominado "escudamiento". La armadura de barlovento "proteje", en función del espacio entre las armaduras, a la armadura de sotavento. Si el espacio es muy pequeño, el empuje es el mismo que en un elemento simple.

La figura III.2.3. contiene resultados experimentales relacionando los coeficientes de empuje con la relación  $s/h$ , en donde  $h$  es el peralte de la armadura y  $s$  es la separación entre las armaduras. Las curvas A, B, y C son para placas sólidas, la primera para sección circular y las otras dos para placas rectangulares con relación largo-ancho de 2:1 y 9.5:1 respectivamente. Las curvas D, E, F y G son para armaduras con relaciones de solidez de 0.627, 0.435, 0.366 y 0.250 respectivamente. La relación de solidez en pares de armaduras es importante ya que el grado en el que una armadura "proteja" a la otra depende de esta relación.

Cuando el espacio entre las armaduras aumenta, el empuje total se incrementa y puede llegar a ser el doble del de una armadura simple.

Pagon<sup>2</sup> sugiere la siguiente expresión para el coeficiente cuando se trate de pares de armaduras:

$$C = \frac{1.7}{\phi} + \log \frac{s}{h}$$

La figura III.2.3. muestra los coeficientes para direcciones del viento normales al plano de los elementos. Si el viento incide en la armadura con cierto ángulo, el efecto del "escudamiento" es menor que si incidiera normalmente y el empuje total en las dos armaduras aumenta. La figura III.2.4. muestra los valores del coeficiente de empuje con relación al ángulo de incidencia del viento

para varias relaciones  $s/h$  y para armaduras con relación de solidez  $\phi = 0.27$ . Se ha observado que para una armadura con  $\phi = 0.25$ , la diferencia en el coeficiente total entre  $s/h = 0.27$  y  $s/h = 1.22$  es de 40% para un viento normal, - pero solamente de 15% para un ángulo de incidencia de  $20^\circ$ . La misma tendencia se observa en la figura III.2.4.

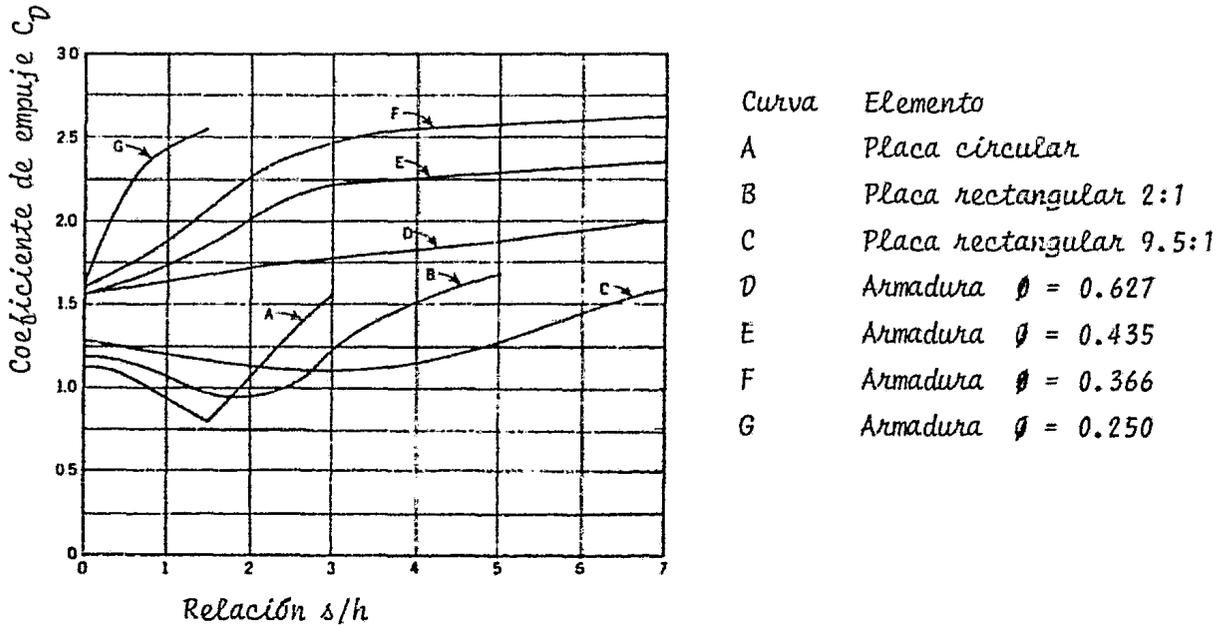


Fig. III.2.3.- Efecto del espacio en los coeficientes en pares de armaduras.

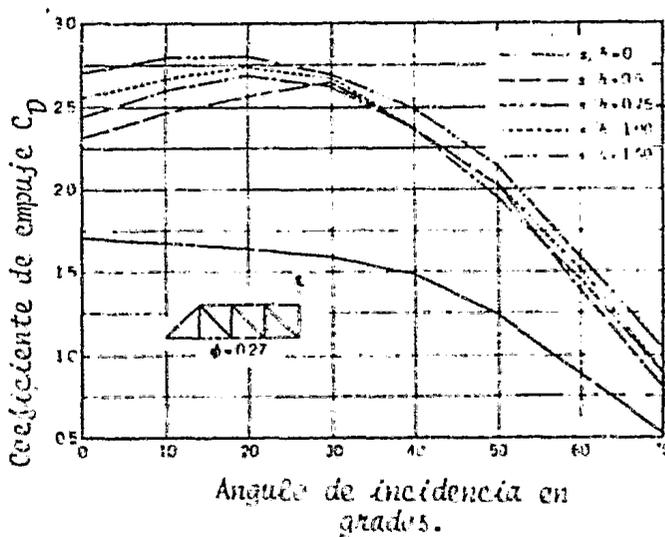


Fig. III.2.4.- Efecto del ángulo de incidencia en pares de armaduras.

Armaduras en torres. - Tal vez el estudio más completo de fuerzas de viento en torres es el presentado por E. Cohen y H. Perrin<sup>3</sup>, quienes proponen la siguiente expresión:

Para torres cuadradas:  $C = 4 - 5\theta$

Para torres triangulares:  $C = 3.65 - 4.65\theta$

Estas expresiones son para un viento perpendicular a una de las caras de la torre. Para torres cuadradas proponen que el valor del coeficiente C sea multiplicado por  $(1.1 + 0.4\theta)$  para tomar en cuenta el ángulo de incidencia que pudiera presentarse.

W. Watters Pagon<sup>4</sup> sugiere la siguiente expresión para torres:

$$C = \sqrt{\frac{3}{2\theta}}$$

En torres cuadradas, los valores presentados por Cohen-Perrin no difieren mucho del valor propuesto por W. Watters Pagon.

### III. 3.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DE COEFICIENTES DE EMPUJE EN TORRES TUBULARES DE ACERO DE SECCION CUADRADA.

Las primeras pruebas en túnel de viento de estructuras tubulares fueron hechas en Japón en 1960. Sichiri<sup>5</sup>, llevó a cabo pruebas en túnel de viento en dos modelos, con relación de solidez igual a 0.25 y 0.48; encontró que el valor de los coeficientes de empuje para modelos de torres tubulares se redujo mientras que el Número de Reynolds aumentó. Con respecto a la dirección del viento con la torre se encontró que el valor del coeficiente para un ángulo de incidencia de 30° es 1.35 veces mayor que para un ángulo de 0°.

Kamei y Uzuki<sup>7</sup>, realizaron en 1982 un estudio en túnel de viento con varios modelos y obtuvieron la relación del coeficiente de empuje con respecto al Número de Reynolds, al efecto que producen las placas de unión y las riostras horizontales, al ángulo de incidencia  $\theta$  y a la solidez de la estructura ( $\theta$ ). Aquí presentamos los resultados que obtuvieron. Para su estudio utilizaron el túnel de viento de la Universidad de Nihon (Japón). El túnel tiene una sección de --

entrada del aire de 2.00 m. por 2.00 m. y de salida de 4.00 m. por 4.00 m., habiendo un espacio de medición de 5.00 m. El flujo usado en los estudios es un flujo uniforme con una intensidad de turbulencia de 0.5%. La velocidad del viento en los experimentos fué medida en intervalos de 2 m/seg en el rango comprendido entre 8 m/seg y 60 m/seg. El ángulo de incidencia del viento es variable con intervalos de 5° desde 0° hasta 45°, lográndose ésto rotando los modelos.

### Sección de los modelos.

En la actualidad se usan varias formas de sección horizontal en las estructuras tipo torre, como son la sección cuadrada, rectangular, triangular y poligonal, siendo la más frecuente la sección cuadrada. Las torres son esbeltas y generalmente van disminuyendo su sección transversal con la altura. La relación de solidez varía grandemente de la parte superior a la parte inferior de la torre.

La figura III.3.1. muestra las secciones de los modelos utilizados para el estudio, todos hechos con tubos de acrílico con una superficie lisa y sin cambiar su sección horizontal con la altura.

Los modelos B-1, B-2 y B-3 en la figura tienen una relación de solidez de 0.1, 0.2 y 0.3 respectivamente.

Los modelos con las secciones B-1-a y B-3-a tienen una relación de área de las placas de unión de 10%, los modelos B-1-d, B-2-c y B-3-d tienen una relación del 20%. B-1-c, B-2-d y B-3-c no tienen placas de unión. Como se muestra en la figura III.3.2., la relación de área de placas de unión es la relación del área total de las placas de unión a el área de los elementos principales y las riostras indicadas con sombra en la figura, esta relación se indica en porcentaje.

Los modelos tipo B-1-b, B-2-b, B-2-c y B-3-b tienen instaladas riostras horizontales.

Como es muestra en la figura III.3.3. las riostras horizontales y unos miembros auxiliares llamados diamante son usados para prevenir la deformación horizontal de la torre.

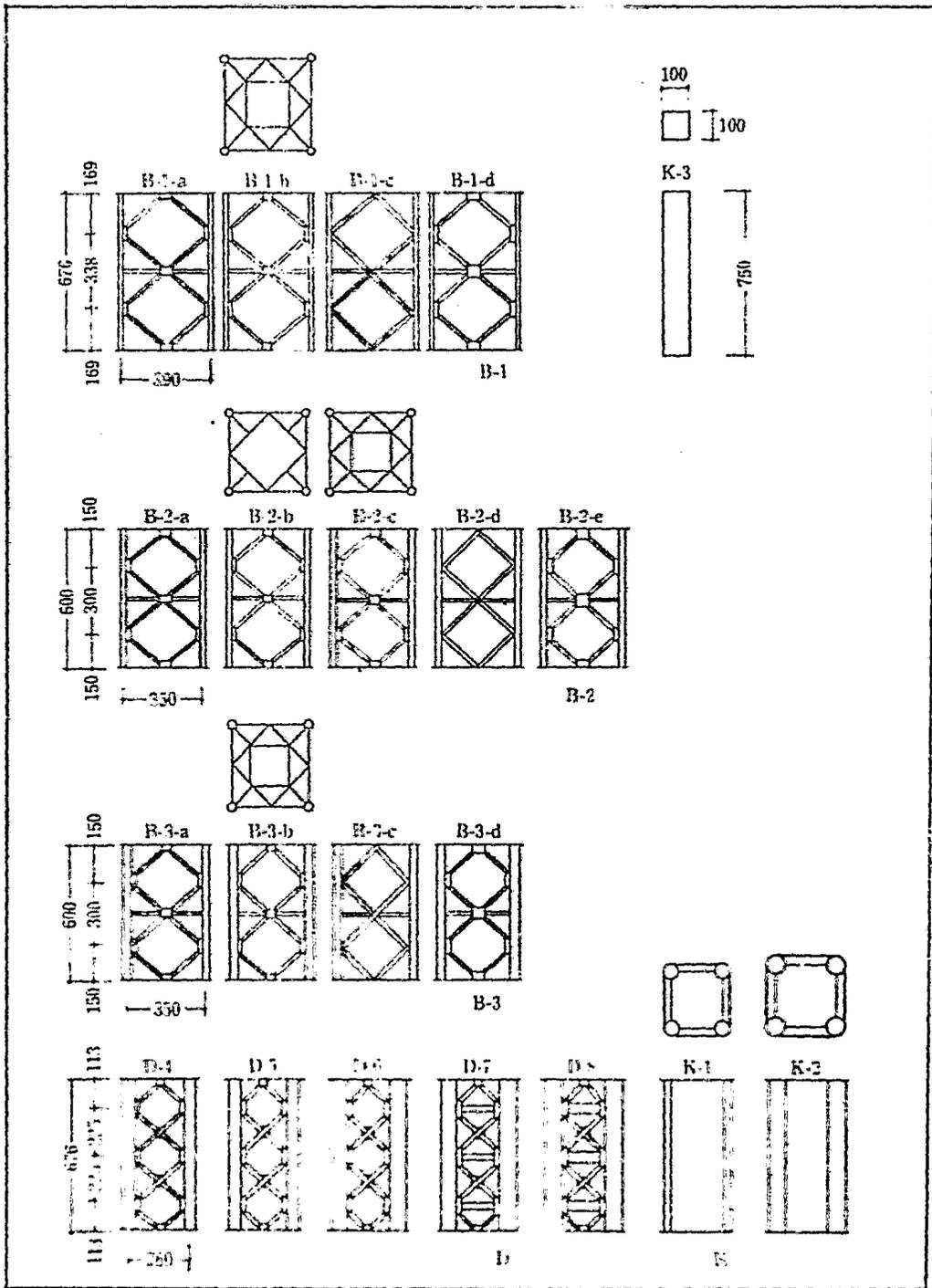


Fig. III.3.1.- Modelos usados en las pruebas realizadas por Kumei-Umezaki.

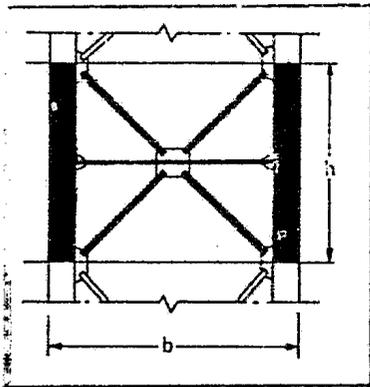


Fig. III.3.2. Relación de áreas de las placas de Unión.

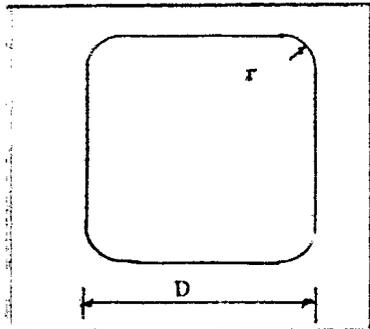


Fig. III.3.4.- Modelo Tipo K

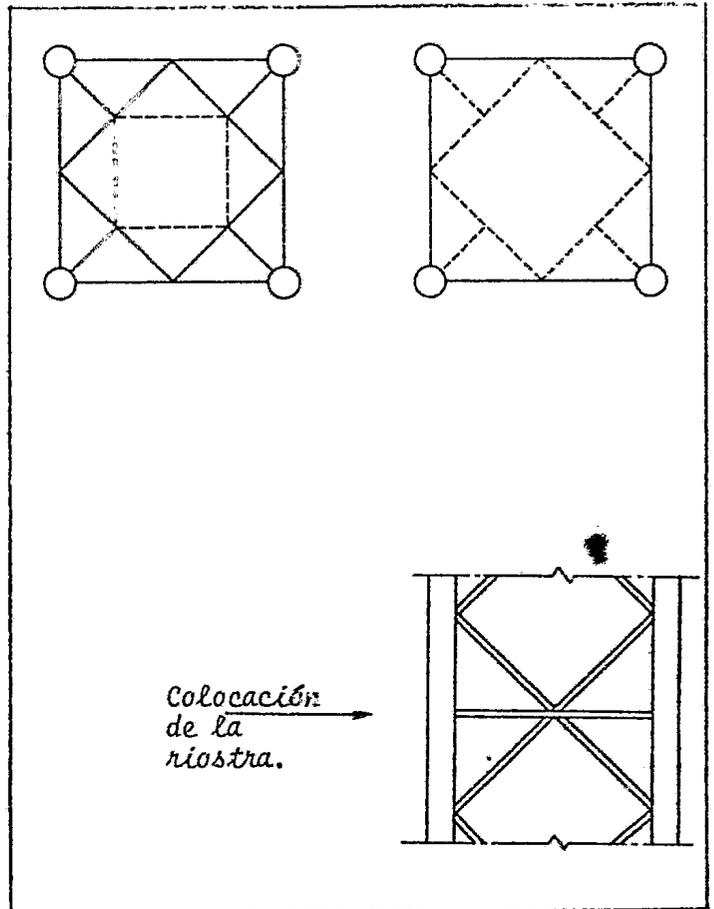


Fig. III.3.3. Miembros con riostras.

Los modelos tipo D fueron preparados para hacer clara la variación de los coeficientes de empuje en el rango de relaciones de solidez mayores que 0.4. Los modelos D-7 y D-8 son generalmente usados para torres de radiocomunicación. El modelo tipo K representa el caso en el cual la relación de solidez es 1.0. Este tipo fué hecho para exarinar la variación del coeficiente de empuje con respecto al radio  $r$  de los elementos principales como se muestra en la figura III.3.4.

El elemento principal en todos los modelos tiene un diámetro de 1.0 cm. a 33.6 cm.

Resultados de las pruebas.

1. Coeficientes de empuje en relación al Número de Reynolds.

En todas las pruebas el Número de Reynolds estuvo comprendido en el rango de  $4.2 \times 10^3$  a  $9.4 \times 10^5$ .

La figura III.3.5. muestra la relación entre el Número de Reynolds y el coeficiente de empuje, de acuerdo a la solidez de la estructura y con un ángulo de incidencia igual a cero. El valor del coeficiente de empuje disminuye -- con el incremento tanto del Número de Reynolds como de la relación de solidez. Los coeficientes para los tipos D-5 a D-8 con una solidez de 0.389 a 0.768 se reducen rápidamente en la vecindad del Número de Reynolds de  $10^5$ .

El modelo K-2 con una solidez igual a la unidad tuvo el mínimo valor del coeficiente para un Número de Reynolds de  $5 \times 10^5$ . De la figura III.3.5. obtenemos una expresión que relaciona la solidez de la estructura con su coeficiente de empuje. Dicha expresión es la siguiente:

$$C_D = 1.27 (1.12 + e^{-4.35\phi})$$

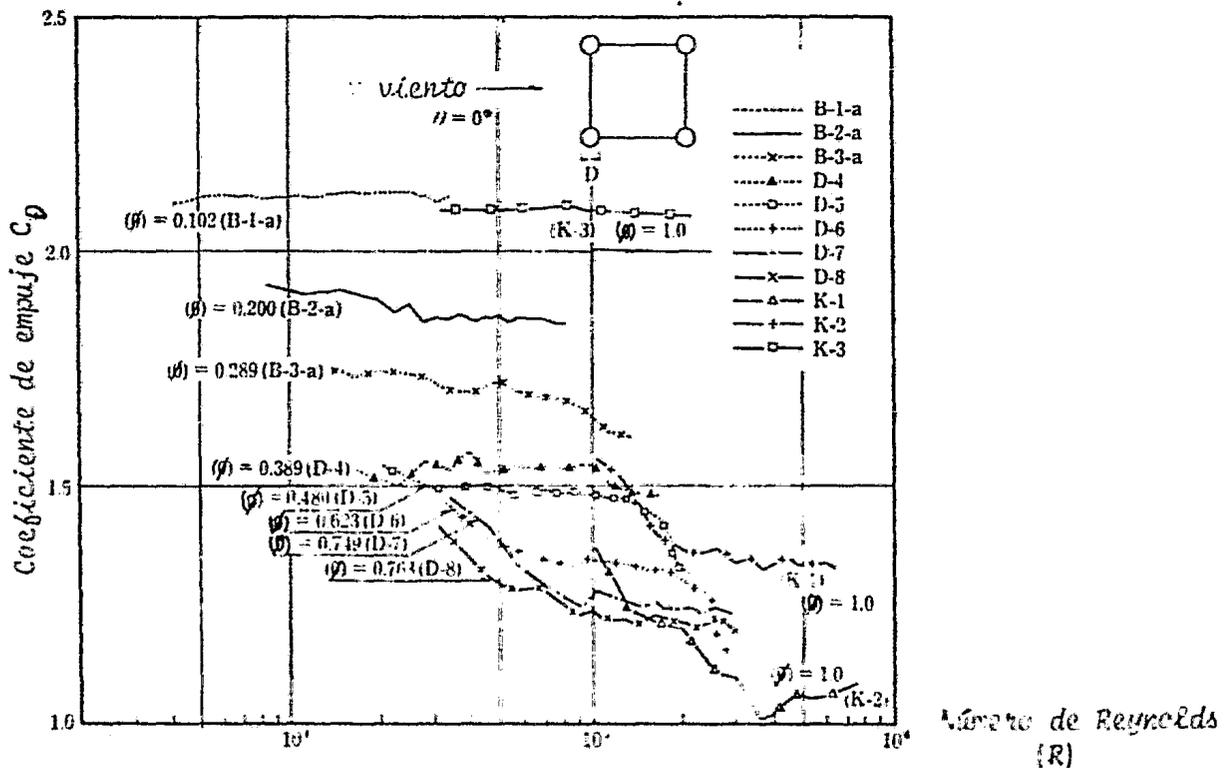


Fig. III.3.5.- Relación entre el Número de Reynolds y el Coeficiente de Empuje.

2. Efecto de las placas de unión y las riostras horizontales  
en los coeficientes de empuje.

La Tabla III.3.1. muestra los valores de los coeficientes de empuje promedio en el rango del Número de Reynolds de  $10^4$  a  $10^5$ , para 13 modelos de prueba de los tipos B-1-a a B-3-d, e indica la relación del área de las placas de unión, (los modelos B-1-c, B-2-d y B-3-c no tienen placas de unión).

El incremento del coeficiente se da en porcentaje. El tipo B-1-a es un modelo de prueba que tiene 10% de área de placas de unión y nos da un 5% de incremento en el valor del coeficiente comparado con B-1-c que no tiene placas de unión. El tipo B-1-b, con riostras en un plano horizontal tiene un coeficiente 6.4% mayor que el tipo B-1-c. Para el tipo B-1-d, teniendo un área de placas de unión del 20%, el valor del coeficiente es 11.3% mayor que el del tipo B-1-c. Resultados similares se observan en los modelos B-2 y B-3.

Se observa que, para una relación de área de las placas de unión del 10% o menores, el incremento en el coeficiente es pequeño: 4.3% a 7.0%, pero para una relación de área de 20%, el incremento en el coeficiente es de 11.1% a 12.5%. El incremento en el coeficiente causado por las riostras horizontales es muy pequeño, del orden de 0.5% a 2.5%.

TABLA III.3.1.- EFECTO DE LAS PLACAS DE UNION PARA ANGULO DE INCIDENCIA =  $0^\circ$ .

TIPO DE MODELO	COEF. DE EMPUJE ( $\phi = 0$ )	INCREMENTO EN EL COEFICIENTE (%)	AREA DE PLACAS DE UNION (%)
B-1-a	2.12	4.9	10
B-1-b	2.15	6.4	10
B-1-c	2.02	0.0	0
B-1-d	2.25	11.3	20
B-2-a	1.80	5.8	10
B-2-b	1.81	6.4	10
B-2-c	1.82	7.0	10
B-2-d	1.70	0.0	0
B-2-e	1.89	11.1	20
B-3-a	1.67	4.3	10
B-3-b	1.71	6.8	10
B-3-c	1.60	0.0	0
B-3-d	1.80	12.5	20

### 3. Relación entre el coeficiente de empuje y el ángulo de incidencia del viento.

El ángulo de incidencia tuvo una variación de 0° a 45° en intervalos de 5°. El coeficiente de empuje en relación al ángulo de incidencia del viento se muestra en la figura III.3.6. La velocidad del viento en el túnel fué de 40 m/seg y el Número de Reynolds de  $1 \times 10^4$  a  $1 \times 10^5$ . El coeficiente tiene casi el mismo valor (0.95) en el rango comprendido de 5° a 45°.

La relación de áreas (área con ángulo de incidencia diferente de cero entre área con ángulo igual a cero), la relación de fuerzas del viento (fuerza de viento con ángulo de incidencia diferente de cero entre fuerza de viento con ángulo igual a cero) y la relación entre fuerzas de viento y áreas con respecto al ángulo de incidencia del viento están tabuladas en las Tablas III.3.2., III.3.3. y III.3.4. respectivamente.

Para el tipo B-1-a con una solidez de 0.102, la relación de áreas tuvo el valor más alto de 2.34 para un ángulo de 30° y se redujo gradualmente hasta 1.71 para el tipo D-8 con solidez de 0.768.

Observamos en la Tabla III.3.4. que la relación fuerza de viento-área para cada tipo es constante entre ángulos de 5° y 45°, por ejemplo, para los tipos B-1-a, B-2-a y B-3-a su valor es de 0.49, 0.52 y 0.57 respectivamente. La misma relación de proporción se observa para el caso en que la velocidad en el túnel de viento es de 20 m/seg y 30 m/seg.

TABLA III.3.2.= RELACION DE AREAS CON RESPECTO AL ANGULO DE INCIDENCIA

MODELO TIPO	$\theta$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
B-1-a	0.102	1.00	2.16	2.25	2.29	2.31	2.32	2.34	2.34	2.33	1.54
B-2-a	0.200	1.00	2.00	2.19	2.35	2.28	2.31	2.32	2.31	2.27	1.54
B-3-a	0.289	1.00	1.82	2.06	2.14	2.19	2.23	2.23	2.22	2.16	1.53
D-4	0.389	1.00	1.60	1.88	2.02	2.06	2.12	2.13	2.11	2.01	1.51
D-5	0.480	1.00	1.45	1.74	1.88	1.97	2.02	2.03	1.99	1.89	1.50
D-6	0.623	1.00	1.29	1.51	1.64	1.75	1.81	1.81	1.77	1.66	1.46
D-7	0.749	1.00	---	1.45	---	1.66	---	1.72	---	---	1.43
D-8	0.768	1.00	---	1.45	---	1.66	---	1.71	---	---	1.43

TABLA III.3.3.- RELACION DE FUERZAS DEL VIENTO CON RESPECTO AL ANGULO DE INCIDENCIA.

MODELO TIPO	$\theta$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
B-1-a	0.102	1.00	1.08	1.10	1.12	1.12	1.13	1.12	1.11	1.10	1.10
B-2-a	0.200	1.00	1.08	1.16	1.19	1.20	1.20	1.21	1.19	1.17	1.15
B-3-a	0.289	1.00	1.05	1.15	1.22	1.26	1.28	1.24	1.22	1.19	1.21
D-4	0.389	1.00	1.06	1.13	1.31	1.34	1.34	1.32	1.32	1.30	1.29
D-5	0.480	1.00	1.03	1.09	1.23	1.27	1.28	1.28	1.27	1.26	1.26
D-6	0.623	1.00	0.99	0.98	1.00	1.05	1.26	1.26	1.30	1.27	1.24
D-7	0.749	1.00	---	0.99	---	0.95	---	1.09	---	---	1.16
D-8	0.768	1.00	---	0.97	---	0.95	---	1.11	---	---	1.15

TABLA III.3.4.- RELACION FUERZAS DE VIENTO/AREAS

MODELO TIPO	$\theta$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
B-1-a	0.102	1.00	0.50	0.49	0.49	0.49	0.49	0.48	0.48	0.47	0.71
B-2-a	0.200	1.00	0.54	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	0.75
B-3-a	0.289	1.00	0.57	0.58	0.57	0.57	0.57	0.56	0.55	0.55	0.75
D-4	0.389	1.00	0.66	0.64	0.64	0.65	0.64	0.63	0.63	0.64	0.85
D-5	0.480	1.00	0.71	0.64	0.65	0.64	0.63	0.63	0.63	0.64	0.84
D-6	0.623	1.00	0.76	0.62	0.62	0.62	0.62	0.65	0.65	0.67	0.85
D-7	0.749	1.00	---	0.65	---	0.60	---	0.63	---	---	0.82
D-8	0.768	1.00	---	0.65	---	0.60	---	0.63	---	---	0.81

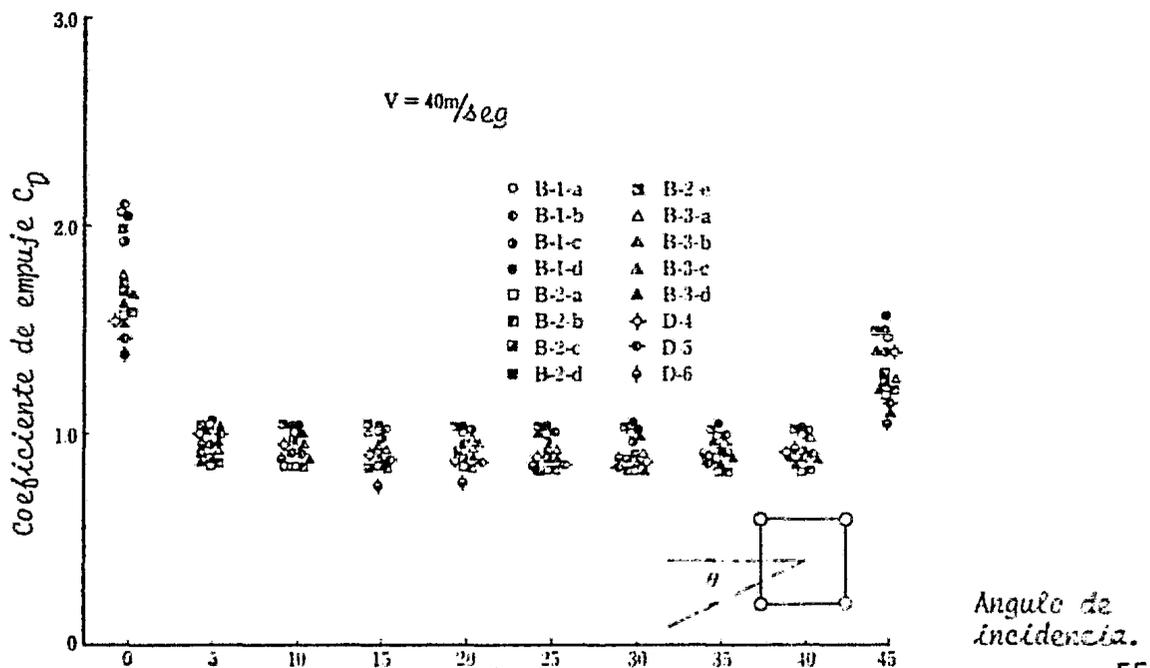


Fig. III.3.6.- Relación entre el Coeficiente de Empuje y el ángulo de incidencia.

4. Relación entre los coeficientes de empuje y la solidez de la estructura.

La figura III.3.7. muestra la relación entre los valores medidos del coeficiente de empuje y su solidez para un ángulo de incidencia de  $0^\circ$ . En la figura se muestran los resultados experimentales que hay en la literatura, los valores obtenidos en el experimento son bastante parecidos a estos valores.

La figura III.3.8. muestra la relación entre el coeficiente de empuje y la solidez para ángulos de incidencia comprendidos entre  $5^\circ$  y  $40^\circ$ . Se observa un valor constante igual a 0.95 en el rango de solidez de 0.2 a 0.9.

La figura III.3.9. muestra los resultados para un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ . La magnitud de los coeficientes para ángulos de incidencia de  $45^\circ$  están comprendidos entre los coeficientes para ángulos de  $0^\circ$  y de  $5^\circ$  a  $40^\circ$ .

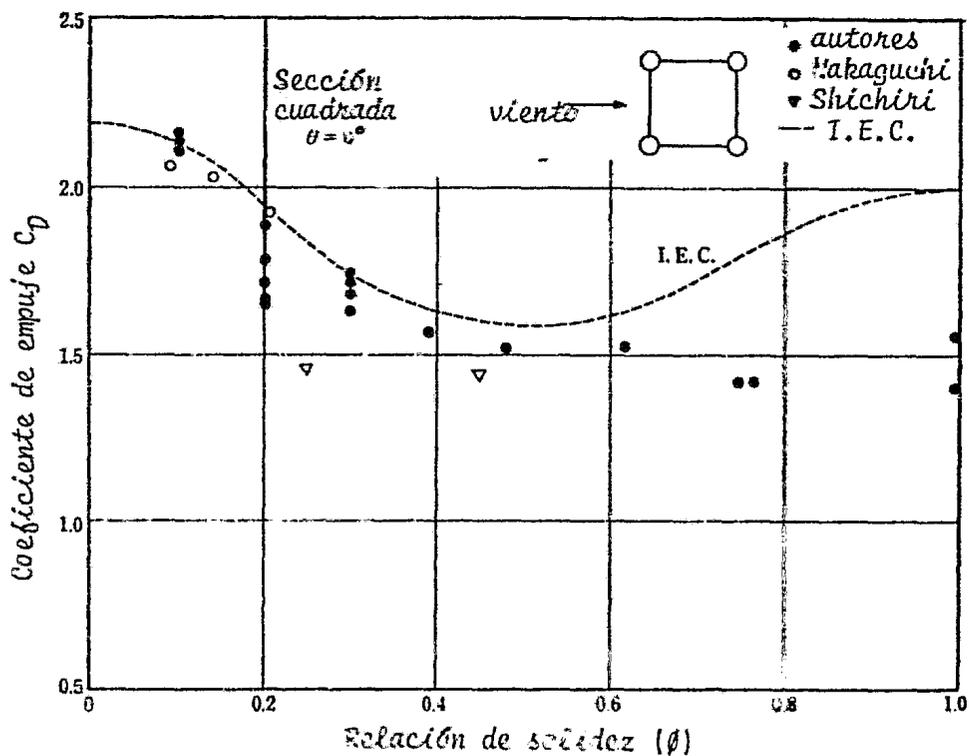


Fig. III.3.7.- Relación entre los coeficientes de empuje y su solidez para ángulo de incidencia de cero.

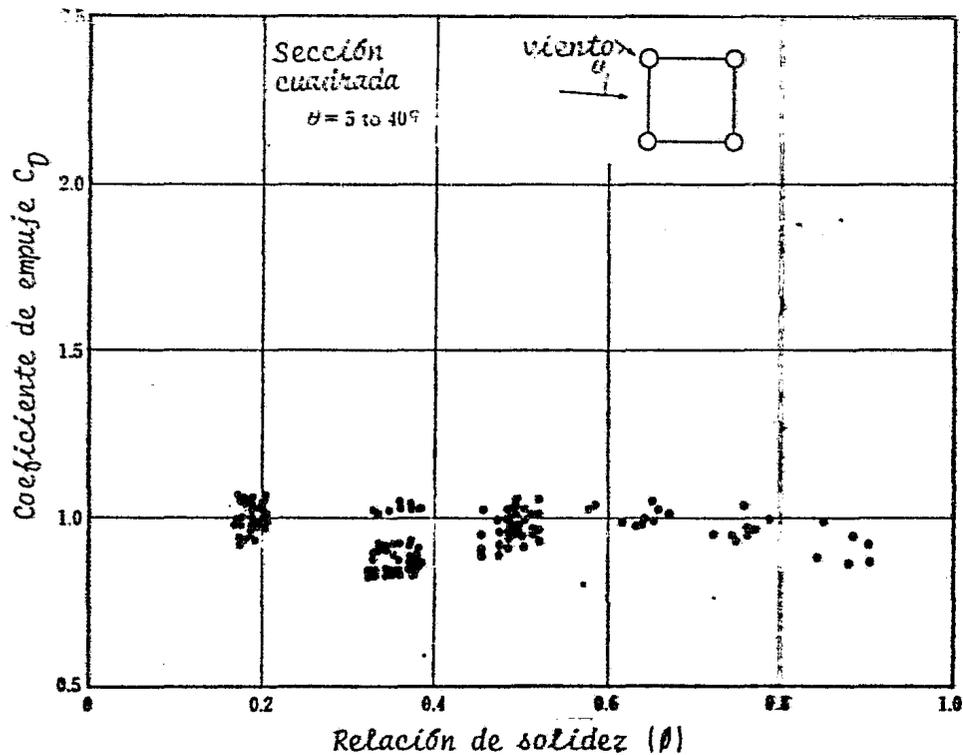


Fig. III.3.8.- Relación entre los coeficientes de empuje y su solidez para ángulos de incidencia comprendidos entre  $5^\circ$  y  $40^\circ$ .

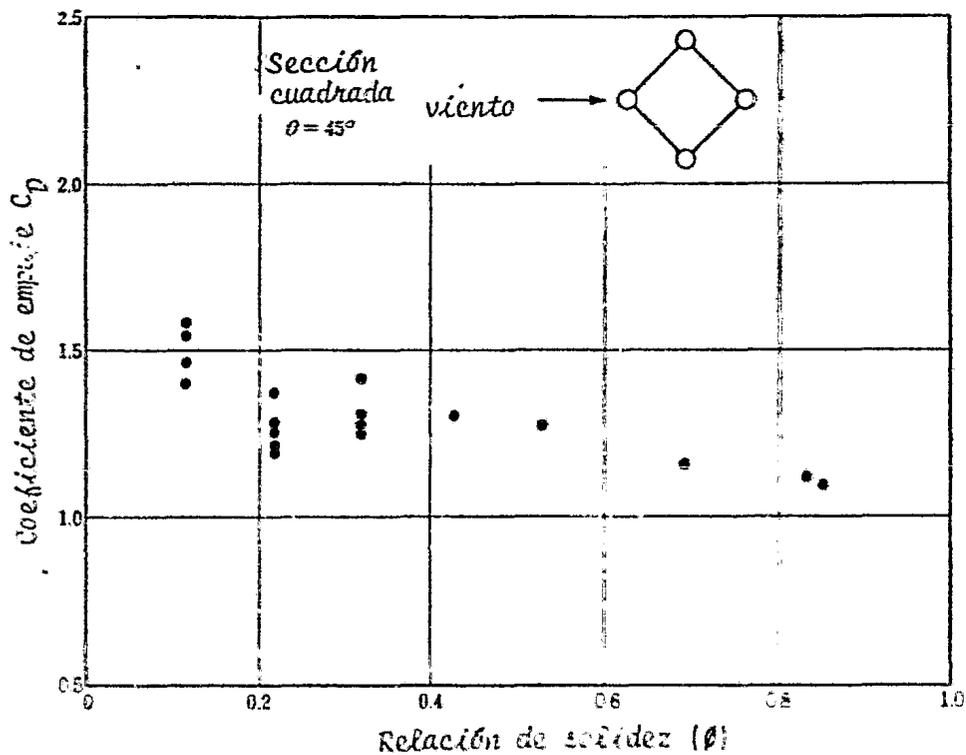


Fig. III.3.9.- Relación entre los coeficientes de empuje y su solidez para ángulo de incidencia de  $45^\circ$ .

Los coeficientes de empuje presentados en este estudio toman en cuenta la interferencia de la estructura de barlovento a la estructura de sotavento. De este estudio se pueden hacer las siguientes observaciones:

El valor del coeficiente de empuje en torres tubulares de acero se reduce con el incremento del Número de Reynolds y tiene un valor mínimo cuando el Número de Reynolds es de  $5.0 \times 10^5$  y cuando la solidez es mayor que 0.4. Los valores de los coeficientes son menores para los tipos en que la solidez es mayor.

El valor de los coeficientes es casi constante en relación a la solidez de la estructura en el rango de ángulos de incidencia de  $5^\circ$  a  $45^\circ$ .

Para la estimación de cargas por viento, es conveniente seleccionar el coeficiente de empuje por el grado de solidez de la torre. Como se ha mostrado, los coeficientes se dividen con relación a su solidez, en tres grupos de acuerdo al ángulo de incidencia.

#### REFERENCIAS

1. "Aerodynamics and the Civil Engineer", por W.W. Pagon, Engineering News-Record, Vol. 112, 1934, pag. 348; Vol. 113, 1934, pags. 41, 456, 814; Vol. 114, 1935, pags. 582, 665, 742; Vol. 115, 1935, pag. 601.
2. Closure to "Wind Forces on Structures: Plate Girders and Trusses", por W.W. Pagon, Proceedings, A.S.C.E., Vol. 85, N° ST7, Septiembre 1959.
3. "Design of Multi-Level Guyed towers; Wind Loading", por Edward Cohen y Henri Perrin, Proc. Paper No. 1355 A.S.C.E., Vol. 85, No. ST5, Septiembre 1957.
4. "Wind Forces on Structures: Plate Girders and Trusses", por W.W. Pagon, Proc. Paper N° 1711, A.S.C.E., Vol. 84, N° ST4, Julio 1958.
5. "Wind pressure on pipe tower", por Y. Shichiri (en japonés), Journal of the Institution of Electrical Engineers, Japon, Vol. 86, pags. 196-200, Agosto 1966.
6. "Static wind load on towers of frame work structure", por H. Nakaguchi, I. Arai y M. Matsuzaka (en japonés), Journal of the Japan Society for Aeronautical and Spaces Sciences, Vol. 12, N° 121, pags. 29-36, Feb. 1964.
7. "Experimental Study on Drag Coefficient of the Steel Pipe Tower Having some Square Section", por Isamu Kamei y Hideo Uzuki, Report of the Research Institute of Industrial Technology, Nihon University, No. 12, Junio 1982.

# CAPITULO IV

## EJEMPLO ILUSTRATIVO TORRE TELEVISA

IV.1.- DESCRIPCION DEL PROBLEMA

IV.2.- ANALISIS DE LAS FUERZAS POR VIENTO DE ACUERDO CON EL MANUAL DE LA COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

IV.3.- ANALISIS DE LAS FUERZAS POR VIENTO DE ACUERDO CON EL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DEL DISTRITO FEDERAL

IV.4.- UTILIZACION DE LOS COEFICIENTES DE EMPUJE SEGUN LA A.S.C.E.

IV.5.- UTILIZACION DE LOS COEFICIENTES DE EMPUJE SEGUN ESTUDIOS JAPONESES

IV.6.- CUADROS COMPARATIVOS

#### IV.1.- DESCRIPCION DEL PROBLEMA

El ejemplo que vamos a considerar es una torre de acero que Televisa ha construído para las antenas de sus diferentes canales. La torre tiene una altura total desde el nivel del terreno de 184.00 m. Se trata de una estructura formada por armaduras, la magnitud de la cual hace que sea idónea para estudiarla en lo que a viento se refiere.

La estructura se compone de tres partes principales:

- 1) La de mayor magnitud es la estructura inferior, montada sobre una estructura de concreto de 14.10 m. de altura. Esta estructura formada por placas de acero tiene una base de 15.00 m. X 15.00 m. y va disminuyendo gradualmente hasta la altura de 110.00 m. donde la sección horizontal es de 4.00 m. X 4.00 m. De allí - continúa una estructura de sección horizontal cuadrada de 4.00 m. X 4.00 m. hasta el nivel 130.00 m. Esta estructura se compone de 253 nudos y 505 miembros por lado.
- 2) La segunda parte es una estructura de sección cuadrada de 1.50 m. por lado, de 28.00 m. de altura y que alcanza el nivel de 156.00 m. sobre el terreno. Esta estructura tiene un total de 51 nudos y 110 miembros por lado, hechos también de placas de acero. Esta estructura está introducida en la anterior 4.00 m. y se apoya en una retícula de acero en el nivel 128.00 m.
- 3) Por último tenemos una antena tubular de acero con diámetro de 0.61 m. y - 28.00 m. de altura llegando hasta el nivel de 184.00 m. Esta antena también se - introduce en la estructura superior 4.00 m. y se apoya en una retícula de acero.

Procederemos a estudiar la estructura en las tres partes mencionadas, haremos el cálculo de las fuerzas por viento en la antena y veremos qué efecto transmite a la estructura superior. De igual manera haremos el cálculo de la estructura superior para ver los efectos que transmite a la estructura inferior.

Vamos a hacer el estudio de acuerdo a los reglamentos de la Comisión Federal de Electricidad y del Distrito Federal. Adicionalmente a estos haremos un - cálculo de fuerzas del viento utilizando los coeficientes de empuje que propener

la A.S.C.E. y Kamei-Uzuki, mencionados en el capítulo III, con el fin de comparar los resultados.

#### IV. 2.- ANALISIS DE LAS FUERZAS POR VIENTO DE ACUERDO CON EL MANUAL DE LA COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD.

Según la clasificación de estructuras, esta estructura pertenece al grupo "A" puesto que en caso de fallar, causaría pérdidas directas o indirectas excepcionalmente altas en comparación con el costo necesario para aumentar su seguridad.

De acuerdo a la clasificación según las características de respuesta ante el viento, es una estructura tipo 2, dado que su esbeltez hace que sea sensible a ráfagas de corta duración.

Velocidad de diseño:

Zona eólica 5: Velocidad regional  $90 \text{ km/h} = V_R$

Dada la altura de la estructura consideramos que se encuentra en campo abierto puesto que las edificaciones que la rodean no influyen en ella, por lo que el factor de topografía es igual a 1.

$$V_B = K V_R = (1) (90) = 90 \text{ km/h}$$

Tipo de terreno: Campo abierto  $\alpha = 0.14$

Altura gradiente = 275.00 m.

Velocidad hasta 10.00 m. de altura  $V_Z = V_B = 90 \text{ km/h}$

Para más de 10.00 m. de altura  $V_Z = V_B \left(\frac{z}{10}\right)^{0.14} = 90 \left(\frac{z}{10}\right)^{0.14}$

Para obtener la velocidad de diseño,  $V_D$ , se tomará en cuenta el efecto de ráfagas en la estructura, multiplicando la velocidad de viento,  $V_Z$ , obtenida de la manera mencionada arriba, por un factor de ráfaga, en este tipo de estructura valdrá 1.3.

$$V_{D10} = F_R V_{10} = 1.3 (90) = 117 \text{ km/h.}$$

$$V_{DZ} = F_R V_Z = 1.3 (90) \left(\frac{z}{10}\right)^{0.14} = 117 \left(\frac{z}{10}\right)^{0.14}$$

AREA EXPUESTA:- En la estructura que nos ocupa el área expuesta se considerará como el 20% del area limitada por las aristas exteriores de la armadura.

Presión del viento:

La presión se obtendrá mediante la expresión:

$$P = 0.0048 G C V_D^2$$

$$G = \frac{8+2.2}{8+2(2.2)} = 0.82$$

a) Estructuras inferior y superior.

Coefficiente de empuje: en armaduras aisladas se considera un coeficiente de 1.8 . Además, por ser una armadura con sección horizontal cuadrada (es decir, - una armadura siempre quedará protegida por la otra), el coeficiente debe modificarse de acuerdo a la relación rx, en donde x es la relación entre separación y peralte de la armadura y r un coeficiente que para armaduras vale 1.5. La relación x en nuestro caso vale 1.

Obtenemos entonces:

$$C = 1.8 + rx = 1.8 + 1.5(1) = 3.3$$

por lo que usaremos 3.3 como valor del coeficiente de empuje.

La expresión para la presión es entonces:

$$P = 0.0048 (0.82) (3.3) V_D^2 = 0.0130 V_D^2$$

$$P = 0.0130 \left(\frac{117}{10} \left(\frac{z}{10}\right)^{0.14}\right)^2 = 0.130 (84.75 z^{0.14})^2$$

$$P = 93.37 (z^{0.28}).$$

b) Antena Tubular.

La única modificación a considerar aquí es el coeficiente de empuje. En este tipo de estructura el coeficiente es 0.7, por lo que obtenemos:

$$P = 0.0048 (0.82) (0.7) (84.75 Z^{0.14})^2$$

$$P = 19.78 Z^{0.28}$$

Esta presión la obtendremos a cada 2.00 m.

En las tablas 1,2 y 3 encontramos un resumen de los cálculos de las fuerzas por viento para la estructura inferior, superior y la antena tubular respectivamente. Para el cálculo de la fuerza hemos aumentado el valor en 5% debido a la excentricidad accidental que debemos tomar en cuenta.

Para poder transmitir los efectos de la antena superior, consideramos que la estructura es un cantilíver apoyado en la estructura superior, y obtenemos sus reacciones. Estas reacciones se sumarán a los miembros que las toman en el momento de analizar la estructura superior. De igual manera hacemos para transmitir los efectos de la estructura superior a la inferior. Las reacciones en la antena las obtenemos haciendo la suma de momentos con respecto a los puntos 1 y 2 igual a cero, de acuerdo a la siguiente figura:

$$R_1 = 6540.11 \text{ kg.}$$

$$R_2 = 4919.11 \text{ kg.}$$

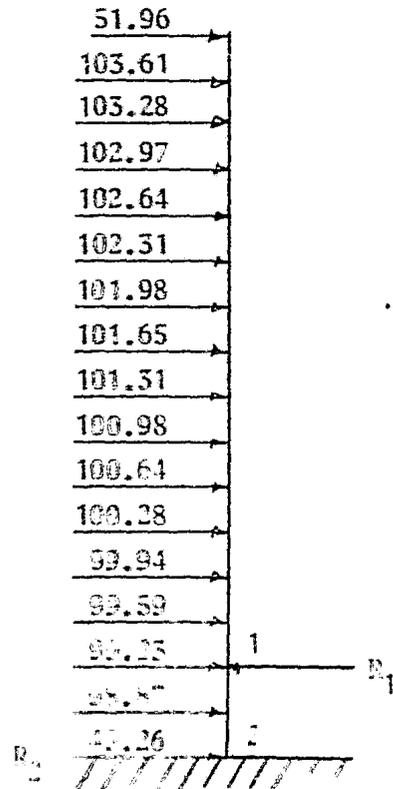


TABLA 1. ESTRUCTURA INFERIOR, COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD.

NIVEL	ALTURA (m)	VELOCIDAD (km/h)	PRESION (kg/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	FUERZA (ton)
0	14.10	122.76	195.88		
1	21.916	130.58	221.63	107.0	4.980
2	29.265	135.97	240.32	94.6	4.774
3	36.175	140.07	255.01	83.6	4.477
4	42.671	143.35	267.08	73.9	4.145
5	48.779	146.06	277.27	65.3	3.802
6	54.522	148.35	286.05	57.7	3.466
7	59.922	150.33	293.72	51.0	3.146
8	65.00	152.05	300.48	58.7	3.704
9	72.86	154.50	310.24	61.8	4.026
10	79.946	156.52	318.41	50.3	3.363
11	86.336	158.21	325.34	40.9	2.794
12	92.907	159.65	331.28	33.2	2.309
13	97.29	160.80	336.41	27.0	1.907
14	101.972	161.94	340.86	21.9	1.568
15	106.194	162.86	344.76	17.8	1.289
16	110.00	163.67	348.17	16.0	1.170
17	114.00	164.49	351.67	16.0	1.182
18	118.00	165.29	355.09	16.0	1.193
19	122.00	166.06	358.41	16.0	1.204
20	126.00	166.81	361.67	16.0	1.215
21	130.00	167.54	364.85	8.0	0.613

TABLA 2. ESTRUCTURA SUPERIOR, COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD.

NIVEL	ALTURA (m)	VELOCIDAD (km/h)	PRESION (kg/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	FUERZA (ton)
1	126.00	166.80	361.67	1.5	0.114
2	128.00	167.16	363.27	3.0	0.229
3	130.00	167.53	364.84	3.0	0.230
4	132.00	167.89	366.41	3.0	0.231
5	134.00	168.24	367.95	3.0	0.232
6	136.00	168.60	369.48	3.0	0.233
7	138.00	168.93	370.99	3.0	0.234
8	140.00	169.27	372.49	3.0	0.235
9	142.00	169.61	373.98	3.0	0.236
10	144.00	169.94	375.45	3.0	0.236
11	146.00	170.27	376.90	3.0	0.237
12	148.00	170.59	378.34	3.0	0.238
13	150.00	170.91	379.76	3.0	0.239
14	152.00	171.23	381.17	3.0	0.240
15	154.00	171.55	382.57	3.0	0.241
16	156.00	171.86	383.96	1.5	0.121

TABLA 3. ANTENA TUBULAR, COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD.

NIVEL	ALTURA (m)	VELOCIDAD (km/h)	PRESION (kg/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	FUJERZA (kg)
1	152.00	171.33	80.75	0.61	49.26
2	154.00	171.55	81.04	1.22	98.87
3	156.00	171.86	81.34	1.22	99.23
4	158.00	172.17	81.65	1.22	99.59
5	160.00	172.47	81.92	1.22	99.94
6	162.00	172.77	82.20	1.22	100.28
7	164.00	173.06	82.49	1.22	100.64
8	166.00	173.36	82.77	1.22	100.98
9	168.00	173.65	83.04	1.22	101.31
10	170.00	173.94	83.32	1.22	101.65
11	172.00	174.22	83.59	1.22	101.98
12	174.00	174.51	83.86	1.22	102.31
13	176.00	174.79	84.13	1.22	102.64
14	178.00	175.06	84.40	1.22	102.97
15	180.00	175.34	84.66	1.22	103.28
16	182.00	175.61	84.93	1.22	103.61
17	184.00	175.88	85.19	1.22	51.96

IV. 3.- ANALISIS DE LAS FUERZAS POR VIENTO DE ACUERDO CON EL  
 REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DEL DISTRITO FEDERAL.

De acuerdo a este reglamento, la clasificación de la estructura es la misma que en el caso anterior, es decir, Grupo A, Tipo 2.

Velocidad de diseño.

La velocidad hasta 10.00 m. de altura será de 80 km/h. La velocidad con la altura será proporcional a la raíz cúbica de la altura sobre el terreno. Además, por ser una estructura comprendida dentro del grupo "A", debemos aumentar un 15% las velocidades mencionadas. Este reglamento, al igual que el anterior, indica un factor de ráfaga de 1.3.

La velocidad de diseño será entonces:

$$V_{10} = 80 (1.15)(1.3) = 120 \text{ km/h hasta } 10.00 \text{ m. de altura.}$$

$$V_z = V_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^{1/3} = 120 \left(\frac{z}{10}\right)^{0.33} = 55.68 z^{0.33}$$

Area expuesta.- El área expuesta al viento que indica el reglamento es el área real de sus miembros proyectada sobre un plano normal a la dirección del viento. En este caso, consideraremos el área igual al 80% del área limitada por las aristas exteriores de la armadura, ya que el tipo de estructura nos da un área real muy cercana a la mencionada.

Presión del viento:

La presión se obtendrá mediante la expresión:

$$P = 0.0055 CV^2$$

a) Estructura inferior y superior

En armaduras aisladas se considera un coeficiente de empuje de 2.0 más un valor  $r_x$  obtenido de igual manera que en el caso de la Comisión Federal de Electricidad. De esta manera obtendremos un valor de  $C$ :

$$C = 2 + 1.5 = 3.5$$

La presión será

$$P = (0.0055)(3.5)(55.68 z^{0.33})^2$$

$$P = 11.94 z^{0.66}$$

La presión la obtenemos de igual manera a cada 2.00 m.

Los cálculos están resumidos en las Tablas 4,5 y 6. Los valores de las reacciones de la antena que hay que transmitir a la estructura superior son:

$$R_1 = 28980.49 \text{ kg}$$

$$R_2 = 21886.8 \text{ kg}$$

TABLA 4. ESTRUCTURA INFERIOR, REGLAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL.

NIVEL	ALTURA (m)	VELOCIDAD (km/h)	PRESION (kg/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	FUERZA (ton)
0	14.10	134.51	348.32		
1	21.916	155.81	467.38	107.0	10.502
2	29.265	171.58	566.75	94.6	11.259
3	36.175	184.15	652.78	83.6	11.460
4	42.671	194.57	728.76	73.9	11.309
5	48.779	203.44	796.74	65.3	10.925
6	54.522	211.13	858.11	57.7	10.398
7	59.922	217.88	913.87	51.0	9.787
8	65.00	223.87	964.80	58.7	11.893
9	72.86	232.55	1,041.09	61.8	13.511
10	79.946	239.86	1,107.54	50.3	11.699
11	86.336	246.09	1,165.80	40.9	10.013
12	92.097	251.44	1,217.10	33.2	8.486
13	97.29	256.08	1,262.43	27.0	7.158
14	101.972	260.13	1,302.61	21.9	5.991
15	106.194	263.67	1,338.33	17.8	5.003
16	110.00	266.78	1,370.12	16.0	4.560
17	114.00	269.98	1,403.13	16.0	4.714
18	118.00	273.10	1,435.76	16.0	4.824
19	122.00	276.15	1,468.03	16.0	4.952
20	126.00	279.14	1,499.95	16.0	5.040
21	130.00	282.06	1,531.53	8.0	2.575

TABLA 5. ESTRUCTURA SUPERIOR, REGLAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL.

NIVEL	ALTURA (m)	VELOCIDAD (km/h)	PRESION (kg/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	FUERZA (ton)
1	126.00	279.14	1,499.94	1.5	0.472
2	128.00	280.61	1,515.78	3.0	0.960
3	130.00	282.06	1,531.53	3.0	0.965
4	132.00	283.50	1,547.19	3.0	0.975
5	134.00	284.93	1,562.78	3.0	0.986
6	136.00	286.34	1,578.29	3.0	0.994
7	138.00	287.73	1,593.73	3.0	1.004
8	140.00	289.12	1,609.09	3.0	1.014
9	142.00	290.49	1,624.38	3.0	1.023
10	144.00	291.84	1,639.59	3.0	1.033
11	146.00	293.19	1,654.74	3.0	1.042
12	148.00	294.53	1,669.82	3.0	1.052
13	150.00	295.84	1,684.83	3.0	1.061
14	152.00	297.15	1,699.77	3.0	1.071
15	154.00	298.45	1,714.65	3.0	1.080
16	156.00	299.73	1,729.46	1.5	0.545

TABLA 6. ANTENA TUBULAR, REGLAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL.

NIVEL	ALTEZA (m)	VELOCIDAD (km/h)	PRESION (kg/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	FUERZA (kg)
1	152.00	297.15	340.07	0.61	207.44
2	154.50	298.45	343.94	1.22	418.50
3	156.50	299.79	346.91	1.22	422.13
4	158.00	301.01	348.96	1.22	425.73
5	160.00	302.28	351.89	1.22	429.30
6	162.50	303.53	354.83	1.22	432.89
7	164.00	304.77	357.74	1.22	436.44
8	166.00	306.01	360.64	1.22	439.98
9	168.00	307.23	363.53	1.22	443.50
10	170.00	308.45	366.41	1.22	447.02
11	172.00	309.65	369.28	1.22	450.52
12	174.00	310.85	372.14	1.22	454.01
13	176.00	312.03	374.98	1.22	457.47
14	178.00	313.21	377.82	1.22	460.94
15	180.00	314.38	380.64	1.22	464.38
16	182.00	315.54	383.46	1.22	467.82
17	184.00	316.69	386.26	1.22	235.62

#### IV.4.- UTILIZACION DE LOS COEFICIENTES DE EMPUJE SEGUN LA A.S.C.E.

Aquí vamos a tomar las especificaciones que indica la Comisión Federal de Electricidad (por ser éstas más reales que las que marca el Reglamento del Distrito Federal), las modificaciones serán en lo que respecta a los coeficientes de empuje. La ley de variación de la velocidad con la altura del manual de la C.F.E., se acerca a la realidad y es la que generalmente se utiliza en otros países.

##### a) Estructura superior e inferior.

En el capítulo referente a los coeficientes de empuje (III.), encontramos que para nuestra estructura el valor de C es:

$$C = \frac{1.7}{\emptyset} + \log \frac{s}{h}$$

siendo  $\emptyset$  la relación de solidez de la estructura. En nuestro caso particular  $\emptyset = 0.2$

$$\text{Estructura inferior} \quad C = \frac{1.7}{0.2} + \log \frac{15}{115.9} = 2.91 - 0.88 = 2.02$$

por lo que

$$P = (0.0048) (2.02) (0.82) (84.75 Z^{0.14})^2$$

$$P = 57.10 (Z^{0.28})$$

$$\text{considerando } \alpha = 0.14$$

$$\text{Estructura superior} \quad C = \frac{1.7}{0.2} + \log \frac{1.5}{30} = 2.91 - 1.5 = 1.6$$

$$P = (0.0048) (1.6) (0.82) (84.75 Z^{0.14})^2 = (45.23 Z^{0.28})$$

##### b) Antena Tubular

En este caso el valor del coeficiente es función de la relación  $\frac{h}{d}$  donde h es la altura de la antena y d es el diámetro.

Por lo que

$$\frac{h}{d} = \frac{28}{1.75} = 15.9$$

En la tabla sólo encontramos el valor del coeficiente hasta una relación  $\frac{h}{d} = 25$ , por lo que tomaremos ése valor.

Encontramos que C con esa relación y en la columna correspondiente a cilindro - vale:

$$C = 0.55$$

La presión es entonces:

$$P = 0.0048 (0.55) (0.82) (84.75 Z^{0.14})^2$$

$$P = 15.54 Z^{0.028}$$

Los resultados de los cálculos están en las Tablas 7, 8 y 9. Las reacciones de la antena que se transmiten a la estructura superior son:

$$R_1 = 5138.02 \text{ kg}$$

$$R_2 = 3864.94 \text{ kg}$$

TABLA 7. ESTRUCTURA INFERIOR, ESPECIFICACIONES A.S.C.E.

NIVEL	ALTURA (m)	VELOCIDAD (km/h)	PRESION (kg/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	FUERZA (ton)
0	14.10	122.76	119.79		
1	21.916	130.58	135.53	107.0	3.045
2	29.265	135.97	146.96	94.6	2.919
3	36.175	140.07	155.95	83.6	2.738
4	42.671	143.35	167.48	73.9	2.599
5	48.779	146.06	169.57	65.3	2.325
6	54.522	148.35	174.93	57.7	2.119
7	59.922	150.33	179.62	51.0	1.924
8	65.00	152.05	183.76	58.7	2.265
9	72.86	154.50	189.72	61.8	2.462
10	79.946	156.52	194.72	50.3	2.057
11	86.336	158.21	198.96	40.9	1.709
12	92.097	159.65	202.59	33.2	1.412
13	97.29	160.80	205.73	27.0	1.166
14	101.972	161.94	208.45	21.9	0.959
15	106.184	162.86	210.83	17.8	0.788
16	110.00	163.67	212.92	16.0	0.715
17	114.00	164.49	215.06	16.0	0.722
18	118.00	165.29	217.15	16.0	0.729
19	122.00	166.06	219.19	16.0	0.736
20	126.00	166.81	221.18	16.0	0.743
21	130.00	167.54	223.12	8.0	0.575

TABLA 8. ESTRUCTURA SUPERIOR, ESPECIFICACIONES A.S.C.E.

NIVEL	ALTURA (m)	VELOCIDAD (km/h)	PRESION (kg/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	FUERZA (ton)
1	126.00	166.80	175.19	1.5	0.055
2	128.00	167.16	175.97	3.0	0.111
3	130.00	167.53	176.74	3.0	0.111
4	132.00	167.89	177.49	3.0	0.111
5	134.00	168.24	178.24	3.0	0.112
6	136.00	168.60	178.98	3.0	0.113
7	138.00	168.93	179.72	3.0	0.113
8	140.00	169.27	180.44	3.0	0.113
9	142.00	169.61	181.16	3.0	0.114
10	144.00	169.94	181.87	3.0	0.114
11	146.00	170.27	182.57	3.0	0.115
12	148.00	170.59	183.27	3.0	0.115
13	150.00	170.91	183.96	3.0	0.116
14	152.00	171.23	184.65	3.0	0.116
15	154.00	171.55	185.32	3.0	0.117
16	156.00	171.86	185.99	3.0	0.058

TABLA 9. ANTENA TUBULAR, ESPECIFICACIONES A.S.C.E.

NIVEL	ALTURA (m)	VELOCIDAD (km/h)	PRESION (kg/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	FUERZA ( kF )
1	152.00	171.23	63.44	0.61	58.69
2	154.00	171.55	63.67	1.22	77.67
3	156.00	171.86	63.90	1.22	77.96
4	158.00	172.17	64.13	1.22	78.24
5	160.00	172.47	64.36	1.22	78.52
6	162.00	172.77	64.58	1.22	78.79
7	164.00	173.03	64.80	1.22	79.06
8	166.00	173.36	65.02	1.22	79.32
9	168.00	173.65	65.24	1.22	79.59
10	170.00	173.94	65.46	1.22	79.86
11	172.00	174.22	65.67	1.22	80.11
12	174.00	174.51	65.89	1.22	80.38
13	176.00	174.79	66.09	1.22	80.63
14	178.00	175.06	66.31	1.22	80.89
15	180.00	175.34	66.52	1.22	81.15
16	182.00	175.61	66.72	1.22	81.39
17	184.00	175.88	66.93	1.22	40.83

#### IV.3.- UTILIZACION DE LOS COEFICIENTES DE EMPUJE SEGUN ESTUDIOS JAPONESES.

En este estudio, vamos a suponer que nuestra estructura tiene, en sus elementos principales, miembros tubulares. Esto es incorrecto pero hemos decidido suponerlo así para poder comparar lo que sucede en este tipo de estructuras. Los valores los tomaremos del estudio hecho por Kamei-Uzuki presentado en el capítulo anterior. Al igual que en el ejemplo anterior nos basaremos en el manual de diseño de la Comisión Federal de Electricidad.

##### a) Estructuras superior e inferior.

Tomando como relación de solidez el valor 0.2, encontramos que según la expresión:

$$C = 1.27 (1.12 + e^{-4.35})$$

$$C = 1.95$$

Por lo que la presión será:

$$P = (0.0048) (1.95) (0.82) (84.75 z^{0.14})^2$$

$$P = 55.13 (z^{0.28})$$

##### b) Antena tubular

En el estudio realizado por Kamei-Uzuki no se proponen valores del coeficiente de empuje para antenas tubulares, por lo que utilizaremos los coeficientes propuestos por la A.S.C.E. para calcular los esfuerzos que transmite la antena a la estructura superior. Dichos esfuerzos son los mismos que en el ejemplo anterior (IV.4.).

En las Tablas 10 y 11 aparecen las fuerzas para la estructura superior e inferior.

En la siguiente sección, las Tablas 12, 13 y 14 presentan resumidas las fuerzas por viento en la estructura inferior, superior y antena tubular respectivamente. También se presentan dos gráficas, la primera, velocidad-altura, con las velocidades propuestas por la Comisión Federal de Electricidad y el Reglamento del Distrito Federal. La segunda, presión-altura muestra los resultados obtenidos en los cuatro cálculos anteriores (A.S.C.E., Reglamento del D.F., A.S.C.E. y Kamei-Uzuki).

TABLA 10. ESTRUCTURA INTERIOR, ESTUCCOS JAPONESES.

NIVEL	ALTURA (m)	VELOCIDAD (km/h)	PRESION (kg/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	FUERZA (ton)
0	14.10	122.76	115.65		
1	21.916	130.58	130.85	107.0	2.940
2	29.265	135.97	141.89	94.6	2.819
3	36.175	140.07	150.57	83.6	2.517
4	42.671	143.35	157.69	73.9	2.447
5	48.779	146.06	163.71	65.3	2.245
6	54.522	148.35	168.89	57.7	2.046
7	59.922	150.33	173.42	51.0	1.857
8	65.00	152.05	177.42	58.7	2.187
9	72.86	154.50	183.18	61.8	2.378
10	79.946	156.52	188.00	50.3	1.986
11	86.336	158.21	192.09	40.9	1.650
12	92.097	159.65	195.60	33.2	1.368
13	97.29	160.80	198.63	27.0	1.126
14	101.972	161.94	201.26	21.9	0.925
15	106.194	162.86	203.56	17.8	0.761
16	110.00	163.67	205.58	16.0	0.690
17	114.00	164.49	207.64	16.0	0.698
18	118.00	165.29	209.66	16.0	0.704
19	122.00	166.06	211.63	16.0	0.711
20	126.00	166.81	213.55	16.0	0.717
21	130.00	167.54	215.42	8.0	0.702

TABLA 11. ESTRUCTURA SUPERIOR, ESTUDIOS JAPONESES.

NIVEL	ALTURA (m)	VELOCIDAD (km/h)	PRESION (kg/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	FUERZA (ton)
1	126.00	166.80	213.54	3.5	0.067
2	128.00	167.16	214.49	3.5	0.155
3	130.00	167.53	215.42	3.5	0.156
4	132.00	167.89	216.35	3.5	0.156
5	134.00	168.25	217.26	3.5	0.157
6	136.00	168.60	218.16	3.5	0.157
7	138.00	168.93	219.05	3.5	0.158
8	140.00	169.27	219.94	3.5	0.158
9	142.00	169.61	220.81	3.5	0.159
10	144.00	169.94	221.68	3.5	0.159
11	146.00	170.27	222.54	3.5	0.160
12	148.00	170.59	223.39	3.6	0.141
13	150.00	170.91	224.23	3.6	0.141
14	152.00	171.23	225.06	3.6	0.142
15	154.00	171.55	225.89	3.6	0.142
16	156.00	171.86	226.71	3.5	0.072

IV. 6.- CUADROS COMPARATIVOS.

TABLA 12. CUADRO COMPARATIVO, ESTRUCTURA INFERIOR, FUERZAS EN TON.

NIVEL	ALTURA (m)	C.F.E.	R.D.F.	A.S.C.E.	KAMEI-UZUKI
1	21.916	4.980	10.502	3.045	2.940
2	29.265	4.774	11.259	2.919	2.819
3	36.175	4.477	11.460	2.738	2.517
4	42.671	4.145	11.309	2.599	2.447
5	48.779	3.802	10.925	2.325	2.245
6	54.522	3.466	10.398	2.119	2.046
7	59.922	3.146	9.787	1.924	1.857
8	65.00	3.704	11.893	2.265	2.187
9	72.86	4.026	13.511	2.462	2.378
10	79.946	3.363	11.699	2.057	1.986
11	86.336	2.794	10.013	1.709	1.650
12	92.097	2.309	8.486	1.412	1.368
13	97.29	1.907	7.158	1.166	1.126
14	101.972	1.568	5.991	0.959	0.925
15	106.194	1.289	5.003	0.788	0.761
16	110.00	1.170	4.560	0.715	0.690
17	114.00	1.182	4.714	0.722	0.698
18	118.00	1.193	4.824	0.729	0.704
19	122.00	1.204	4.952	0.736	0.711
20	126.00	1.215	5.040	0.743	0.717
21	130.00	0.613	2.573	0.375	0.362

TAELA 13. CUADRO COMPARATIVO, ESTRUCTURA SUPERIOR, FUERZAS EN TON

NIVEL	ALTURA (m)	C.F.E.	R.D.F.	A.S.C.E.	KAMEI-UZUKI
1	126.00	0.114	0.472	0.055	0.067
2	128.00	0.229	0.960	0.111	0.135
3	130.00	0.230	0.965	0.111	0.136
4	132.00	0.231	0.975	0.111	0.136
5	134.00	0.232	0.986	0.112	0.137
6	136.00	0.233	0.994	0.113	0.137
7	138.00	0.234	1.004	0.113	0.138
8	140.00	0.235	1.014	0.113	0.138
9	142.00	0.236	1.023	0.114	0.139
10	144.00	0.236	1.033	0.114	0.139
11	146.00	0.237	1.042	0.115	0.140
12	148.00	0.238	1.052	0.115	0.141
13	150.00	0.239	1.061	0.116	0.141
14	152.00	0.240	1.071	0.116	0.142
15	154.00	0.241	1.080	0.117	0.142
16	156.00	0.121	0.545	0.058	0.072

TABLA 14. CUADRO COMPARATIVO, ANTENA TUBULAR, FUERZAS EN KG.

NIVEL	ALTURA (m)	C.F.E.	D.D.F.	A.S.C.E.
1	152.00	49.26	207.44	38.69
2	154.00	98.87	418.50	77.67
3	156.00	99.23	422.13	77.96
4	158.00	99.59	425.73	78.24
5	160.00	99.94	429.30	78.52
6	162.00	100.28	432.89	78.79
7	164.00	100.64	436.44	79.06
8	166.00	100.98	439.98	79.32
9	168.00	101.31	443.50	79.59
10	170.00	101.65	447.02	79.86
11	172.00	101.98	450.52	80.11
12	174.00	102.31	454.01	80.38
13	176.00	102.64	457.47	80.63
14	178.00	102.97	460.94	80.89
15	180.00	103.28	464.38	81.15
16	182.00	103.61	467.82	81.39
17	184.00	51.98	235.62	40.83

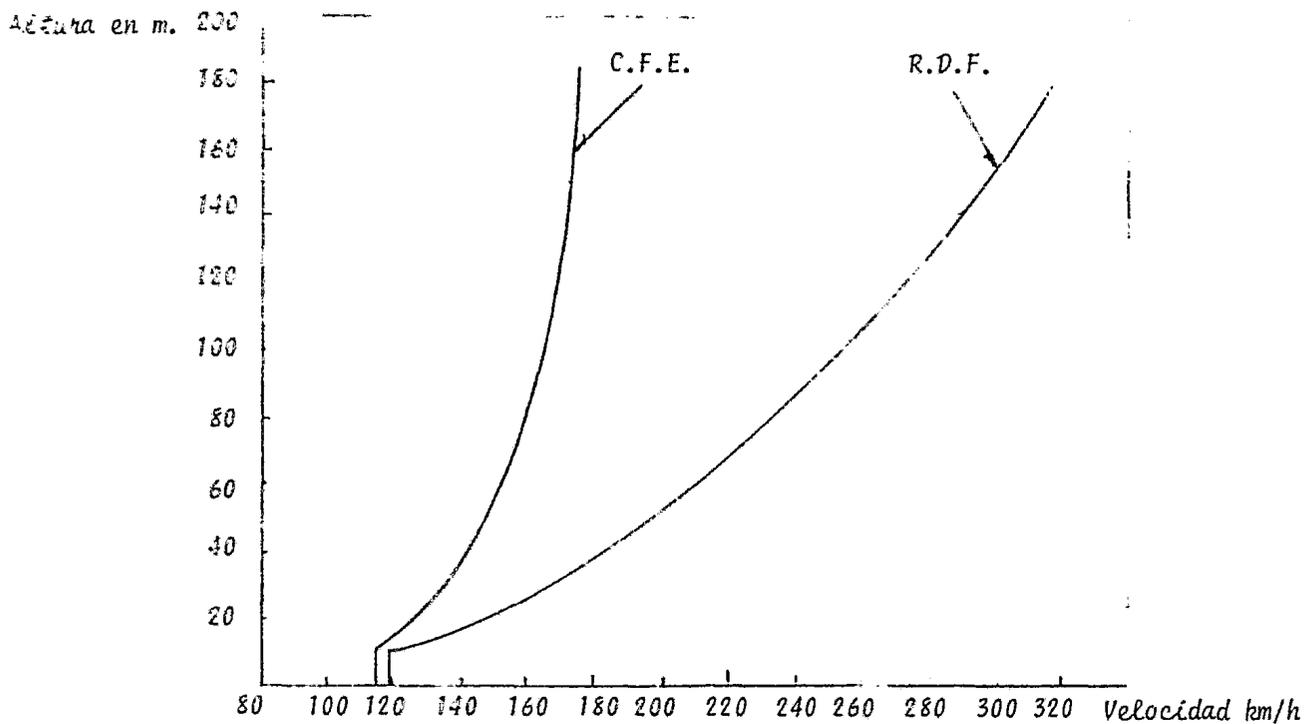


Fig. 1.- Grafica de Velocidades.

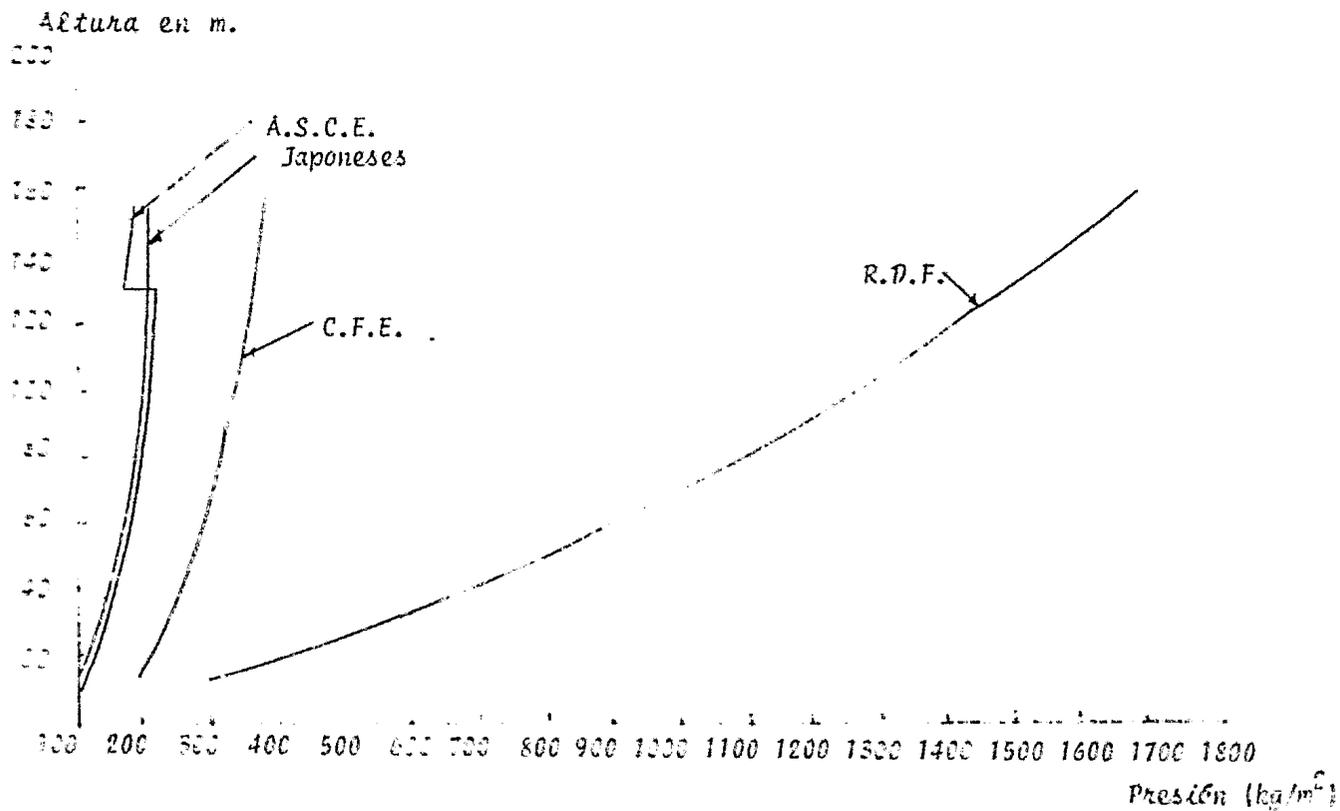


Fig. 2.- Gráfica de presiones.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

De los cálculos hechos en la estructura anterior observamos una notable diferencia en las fuerzas por viento obtenidas mediante el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y las obtenidas de acuerdo al Manual de Diseño de la Comisión Federal de Electricidad y la utilización de los coeficientes de empuje propuestos por la A.S.C.E. y Kamei-Uzuki. Esta diferencia puede ser debido a:

- a) El valor de la velocidad básica de diseño de 85 km/h que probablemente sea muy alta para centros de ciudades.
- b) El valor de  $\alpha = 0.33$  en la velocidad de diseño con relación a la altura. Podemos aceptar como correcta la expresión exponencial propuesta por Davenport, sin embargo, el problema consiste en la determinación adecuada del valor del exponente. El reglamento del Distrito Federal de 1960 indicaba un valor de  $\alpha = 0.20$  que, por mediciones hechas en edificios -- reales, se observa, es más cercano a la realidad.
- c) Los coeficientes de empuje para este tipo de estructura. En el caso de una estructura especial por su forma o su magnitud -- como lo es la estructura que nos ocupa -- para que el valor del coeficiente de empuje sea con fiable se deben realizar pruebas con un modelo a escala en un túnel de -- viento. En la realidad es muy costoso hacer esto, por lo que generalmen -- te se busca un valor en tablas, que represente lo más cerca posible, -- nuestra estructura particular. Sin embargo se observa que utilizando -- los coeficientes del Manual de Diseño de la Comisión Federal de Electri -- cidad y los propuestos por la A.S.C.E. y por Kamei-Uzuki, las fuerzas ob -- tenidas no son tan grandes como las encontradas utilizando el Reglamen -- to de Construcciones del Distrito Federal.

En México las construcciones son cada vez más altas y es en este tipo -- de estructuras en donde el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal,

nos da fuerzas de viento muy diferentes a las reales, lo que indica que es necesario estudiar este problema.

Las fuerzas debidas al viento son dificiles de evaluar, en primer lugar, por la complejidad del fenómeno y en segundo, por la incertidumbre de los datos estadísticos de vientos máximos que se han de utilizar. Es importante continuar el estudio de este problema, ya que cada vez se hace más indispensable debido al -- avance de la tecnología y las exigencias de construcción en nuestro país. A la vez es indispensable la medición confiable de velocidades de viento en todo el -- país, ya que la velocidad de diseño es la base para la determinación correcta de las fuerzas debidas al viento y a su vez para la construcción óptima de las es-- tructuras.

## BIBLIOGRAFIA

1. Aguirre Romero, Jorge; Sánchez Sesma, Jorge; Villegas Villareal, Agustín; Las Velocidades Máximas de Viento en México. IV. Congreso Nacional de Ingeniería Estructural; Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Morelia, Michoacán, del 24 al 27 de marzo de 1982. México.
2. Aresu, Fernando; De Buen, Oscar; Esteva, Luis; Gutiérrez Alberto; Olagaray, Carlos; DePablo, Francisco; Ruiz, Daniel. editores. Apuntes de Diseño Estructural. Fac. de Ingeniería, UNAM, México, 1972.
3. Davenport, A.G., " gust Loading Factors". Proceedings, A.S.C.E., Structural Division, Junio 1967.
4. Davenport, A.G., "The treatment of Wind Loading on Tall Buildings". (The proceedings of a symposium held at the University of Southampton), Ed., A. Coull y B. Stafford Smith, Pergamon Press, 1967.
5. De Buen y López de Heredia, Oscar, El Diseño por Viento de Edificios Altos y el Reglamento de las Construcciones para el Distrito Federal. III Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Morelia, Michoacán, del 24 al 27 de marzo de 1982. México.
6. Ghiocei, D.; Lungu, D., Wind, Snow and Temperature effects on Structures based on Probability. Abacus House, Kent, England, English edition. 1975.
7. Gould, P.L.; Abu-sitta, S.H., Dynamic Response of Structures to Wind and Earthquake Loading. Halsted Press, a Division of John Wiley & Sons. New York, 1980.
8. Hiriart Urdanivia, Humberto, ed. Manual de Diseño de Obras Civiles, Estructuras, Diseño por Viento. Comisión Federal de Electricidad, México, 1981.
9. Houghton, E.L.; Carruthers, N.B., Wind Forces on Buildings and Structures, an Introduction. Halsted Press, a Division of John Wiley & Sons, Inc. New York, 1976.
10. Kamei, Isamu, Uzuki, Hideo. Experimental Study of Drag Coefficient of the Steel Pipe Tower Having Square Section. Report of the Research Institute of Industrial Technology. Nihon University, Japón, Junio 1982.
11. Manual de Diseño por Viento, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Series del Instituto de Ingeniería, N°407, UNAM, México, 1977.
12. Mc Guire, William. Steel Structures, Structural Analysis and Design Series, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1968.

13. Prandtl, L.; Tietjens, O.G. Applied Hydro and Aeromechanics, Transactions, McGraw-Hill, New York, 1934.
14. Rodríguez Cuevas, Neftalí; Variación de la Velocidad del Viento con la Altura en un Punto, Facultad de Ingeniería, UNAM, Revista de Ingeniería, México, octubre 1961.
15. Sherlock, R.H., Variation of Wind Velocity and Gusts with Height, Transactions, A.S.C.E., Vol. 118, N° 2553, 1953.
16. Wind Forces on Structures, Task Committee on Wind Forces, Committee on Loads and Stresses, Structural Division. A.S.C.E.: Final Report, A.S.C.E., Vol. 126, 1961, parte II, pag. 1124.