

"El documento original contiene páginas en mal estado."

mínima capacidad de ráfaga necesaria para envolver la estructura y su modelo acompañante de flujo, y debe estar referido, por lo menos, con una distancia común a las dimensiones de la estructura.

Un análisis de observaciones de la naturaleza del viento hecho con anemómetros y registradores sensibles, para el propósito específico de elegir ráfagas de corta duración, llegó a la conclusión de que la máxima ráfaga de 1 seg. de duración tiene una velocidad de casi 1.3 veces la velocidad básica, y que la máxima ráfaga de 10 seg. es casi 1.1 veces la velocidad básica [4].

Se sugiere, entonces, que el primer factor (1.3) es apropiado para estructuras angostas (carteles y edificios pequeños) y el segundo factor para estructuras anchas, debiéndose usar estos coeficientes como multiplicadores de la velocidad básica del viento. Puesto que la presión estática equivalente es una función del cuadrado de la velocidad, el coeficiente de ráfaga C_r en la Ecuación 6 será el cuadrado de los valores anteriores, es decir, 1.7 ó 1.2.

La asignación de un coeficiente de ráfaga apropiado se relaciona muchas veces con la respuesta dinámica de la estructura; sin embargo, esta relación es insuficientemente documentada como para permitir cualquier generalización por ahora.

2.4 PRESION DE DISEÑO

En las discusiones precedentes se ha tratado con la conducta de los vientos fuertes, prescindiendo de su interacción con una estructura individual. A continuación se verá el efecto sobre la estructura.

Las fuerzas de viento sobre un cuerpo sumergido en una corriente de viento resultan de los cambios de velocidad alrededor del cuerpo. Sobre objetos planos, el arrastre se produce debido, primeramente, a la separación del flujo en los bordes, la formación de estela, y la consiguiente diferencia entre presiones superficiales sobre las caras de barlovento y sotavento. Resultan otras fuerzas adicionales, generalmente menores, como la fricción entre el aire y el cuerpo.

Usualmente, para propósitos de diseño estructural, es bastante exacto considerar la fuerza de viento como una presión estática equivalente. En algunos casos, sin embargo, se debe considerar el tiempo de variación de la fuerza; esto puede deberse a velocidades no constantes o a fuerzas alternantes que resultan de la formación de torbellinos periódicos. Lo último se aplica, principalmente, a estructuras flexibles tales como chimeneas, puentes colgantes, torres de líneas de transmisión, miembros individuales de estructuras reticuladas, y otras.

Teniendo seleccionada una velocidad de viento para diseño (Sección 2.3), el ingeniero puede entonces determinar las

fuerzas resultantes sobre la estructura. Las variables que determinan la magnitud de estas fuerzas son discutidas en esta Sección.

2.4.1 Presión Dinámica

Cuando cualquier objeto es sumergido en una corriente de viento, se producen cambios de dirección y velocidad del flujo debido al paso por dicho obstáculo. Tratando al aire como un fluido ideal (no viscoso e incompresible), suposición suficientemente exacta para propósitos inmediatos, la ley de conservación de energía se representa con la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{1}{2} \rho v_o^2 + p_o = \frac{1}{2} \rho v^2 + p \dots\dots\dots (10)$$

En la cual v_o es la velocidad de la corriente libre próxima, p_o denota la presión estática de la corriente libre próxima y p es la presión estática en un punto sobre el objeto. El término $\frac{1}{2} \rho v_o^2$ es la presión dinámica de la corriente libre y se designa por q . El término $\frac{1}{2} \rho v^2$ es la presión dinámica en algún punto sobre el objeto. Así, la suma de las presiones dinámicas y estáticas es una constante en todos los puntos.

Si el aire es paralizado por chocar contra un cuerpo inmóvil (ver Fig. 9), entonces $v_2 = 0$ y la presión local deberá ser mayor que la presión de corriente libre por un valor $\frac{1}{2} \rho v_1^2$; de la Ecuación 10:

$$p_2 + 0 = p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

En el centro de la parte frontal de un plano, el incremento en presión estática debe igualar la presión dinámica de la corriente próxima. En los bordes y en el sotavento del plano, la velocidad se hace más grande que la de la corriente libre, y se desarrolla una presión negativa (es decir, menor que la atmosférica). Este cambio de presión produce un arrastre o fuerza neta sobre el objeto. En suma, hay fuerzas de fricción pero éstas son generalmente pequeñas para elementos estructurales.

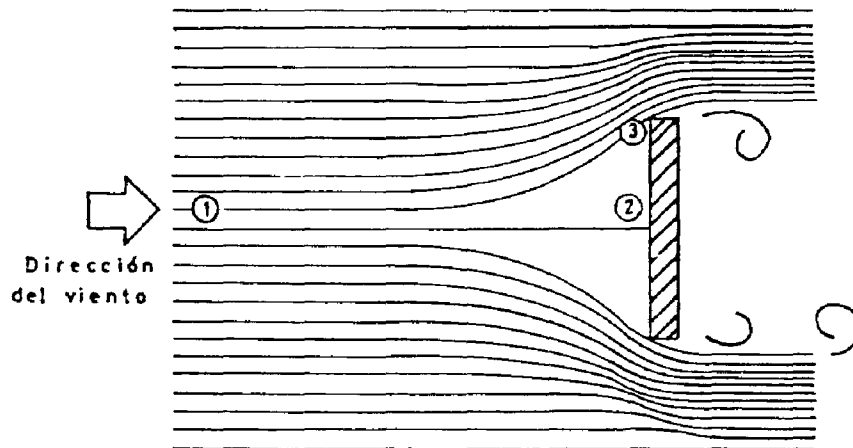


FIG. 9. FLUJO ALREDEDOR DE UN PLANO ANCHO

La presión dinámica convertida a partir de la energía cinética de movimiento del aire se determinará, de la Ecuación 7:

$$q = \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma_0}{g} \right) v^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

donde, para condiciones normales:

q = Presión dinámica (kg/m^2)

γ_0 = Peso específico del aire = 1.23 kg/m^3

g = Aceleración de la gravedad = 9.81 m/seg^2

v = Velocidad del viento (m/seg)

v es el flujo libre e imperturbable de la velocidad del aire. La densidad de masa del aire (ρ) varía con la temperatura y la presión barométrica. En el caso de tempestades tropicales, la densidad puede ser de 5% ó 10% más baja; sin embargo, esto es compensado en algo por el efecto de fuerte aguacero, y el valor anteriormente citado deberá ser usado. Entonces la presión del viento puede expresarse como:

$$q = \frac{v^2}{16} \text{ (kg/m}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

o también:

$$q = 0.005 V^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

en donde V está en km/h .

Las estructuras son esforzadas por diferencias en presión sobre dos superficies o diferencias entre la presión local y la presión de flujo libre. Así, la presión dinámica puede ser la presión efectiva sobre

una superficie.

La presión dinámica es la intensidad de presión local v no es directamente indicativa de la fuerza total sobre un cuerpo, tal como se muestra en la Fig. 9. La fuerza depende del modelo total del flujo alrededor del plano: es decir, la descripción completa de la variación de v y p . Es evidente, por ejemplo, que por el punto 3, donde el flujo se arremolina alrededor del borde del cuerpo, la velocidad v_3 debe ser mayor que la velocidad v_1 del flujo libre y la presión p_3 deberá ser menor que la presión p_1 . puesto que:

$$p_3 + \frac{1}{2} \rho v_3^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

$$p_3 = p_1 - \frac{1}{2} \rho (v_3^2 - v_1^2)$$

De este modo, existe una succión local y una tendencia a arrastrar aquel punto sobre la cara frontal del cuerpo en la dirección viento arriba. La fuerza total sobre el cuerpo mostrado es el efecto integrado de las presiones y succiones sobre ambas caras, frontal y posterior.

2.4.2 Coeficientes de Presión (Cp)

La acción de la presión sobre la superficie de un edificio es conveniente expresarla en términos de la presión dinámica como sigue:

$$p = C_p q \dots\dots\dots (14)$$

donde C_p es un coeficiente de la presión cuyo valor depende de la geometría del edificio y condiciones de flujo locales.

Los coeficientes de presión están especificados para superficies particulares o elementos de un edificio y cuando se multiplican por el área de la superficie y la presión dinámica, dan las cargas de viento actuantes en una dirección normal a aquella superficie o elemento. La resultante total de fuerzas y momentos actuantes sobre el edificio pueden entonces ser determinados considerando las componentes de estas cargas sobre cada una de las superficies o elementos.

Es conveniente también resolver el efecto del viento en dos componentes de fuerza y un momento, y usar coeficientes adimensionales para definir la magnitud de las fuerzas. Así:

$$\text{ARRASTRE (Fuerza paralela al viento)} = C_n q A$$

$$\text{ELEVACION (Fuerza normal al viento)} = C_t q A$$

$$\text{BRAZO DE MOMENTO} = C_e h$$

en la cual C_n es el coeficiente de arrastre, C_t representa el coeficiente de elevación, C_e es el coeficiente de excentricidad, A simboliza el área expuesta, y h alguna dimensión conveniente. El brazo de momento es la distancia desde algún punto de referencia hasta el centro de presión y el momento es esta distancia por la fuerza resultante; excepto para situaciones simétricas, el centro de presión no está usual-

mente en el centroide del área expuesta.

Para algunas formas aerodinámicas, geoméricamente simples, es posible calcular con exactitud la distribución completa de la presión y la fuerza resultante. Para la mayoría, sin embargo, es necesario recurrir a experimentos en túneles de viento u otros métodos empíricos, ya que la ciencia de la Mecánica de Fluidos no ha establecido que pueden realizarse definiciones teóricas certeras.

El ingeniero civil encuentra empíricamente determinadas presiones o coeficientes de forma esenciales, particularmente aquellas que relacionen presiones o fuerzas normales con una superficie bajo la presión dinámica. Estos coeficientes, llamados también Factores de Forma, pueden ser factores de arrastre (presión sobre un muro a barlovento o succión sobre un muro de sotavento, por ejemplo), factores de elevación (succión sobre un techo plano) o una combinación de los dos.

La magnitud de los coeficientes anteriores dependen de:
a) La forma geométrica del objeto, b) Su orientación en la corriente del viento, c) Efectos de fricción, y d) El tamaño del objeto.

Forma Geométrica. Un objeto que es simétricamente "aerodinámico" con la dirección del viento, produce pequeños cambios en la velocidad del flujo del viento:

en consecuencia, las fuerzas principales que actúan sobre la fricción. Las fuerzas del viento sobre cualquier objeto son afectadas según se cambian las condiciones del modelo y la velocidad del viento. Otras fuerzas importantes que modifican el arrastre son: la relación altura-ancho (h/b) y la relación de sólidos (σ) en una plancha perforada, o relación de área sólida a área total. Cuando dos planos o estructuras de celosía forman una obstrucción, el plano de sotavento es "resguardado" por el de barlovento. Cuando el espaciamiento es infinito, es evidente que el caso es de dos planos separados. El grado de resguardo es una función del espaciamiento entre las estructuras, la relación de sólidos, y el ángulo de ataque del viento.

Orientación del objeto en la corriente del viento. En general, el viento no golpea un objeto perpendicularmente a cualquiera de sus ejes. Incluso puede tener un ángulo de ataque vertical en estructuras bajas, posiblemente hasta 20 grados con la horizontal. El ángulo horizontal (desviación lateral) con que ataca el viento puede tener cualquier valor. Por lo tanto, la distribución de presiones sobre un plano, por ejemplo, no es uniforme, y el centro de la presión no estará en el centroide de dicho plano.

Fuerzas de Fricción. En todos los casos anteriores, las fuerzas son resultado del cambio de presión superficial. Fuerzas adicionales surgen de la fricción entre el aire y el objeto. Obviamente, esta fricción

varía con la rugosidad de la superficie del cuerpo; pero, para la mayor parte de estructuras de ingeniería civil, ésta es de menor consecuencia que la forma del cuerpo. De este modo, se hace posible considerar solamente el efecto del número de Reynolds (R).

El número de Reynolds es la relación de la fuerza inercial con la fuerza viscosa que una corriente de fluido ejerce sobre un objeto. La fuerza inercial es el producto de la presión dinámica y el área, y la fuerza viscosa es el arrastre viscoso o fricción entre el fluido y el objeto.

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

en la cual ν es la viscosidad cinemática, h es una dimensión característica del objeto y μ es la viscosidad dinámica.

Efecto del tamaño del objeto. La mayoría de experimentos hechos sobre modelos relativamente pequeños demuestran que hubo un incremento moderado de los coeficientes de arrastre con el aumento de las dimensiones, incluso para objetos romos. Este incremento es pequeño comparado con los otros factores que afectan las fuerzas de viento y puede ser el resultado de un error experimental [2].

2.4.3 Presión Interna

El modelo general de flujo alrededor de tres formas elementales de edificios se muestran en la Fig. 10 [4]. Usualmente en estructuras cerradas, de estos tipos simples, habrá presión sobre el muro de barlovento, presión sobre el techo de barlovento (aunque esté en pendiente) o bien succión, así como succión sobre el muro y techo de sotavento.

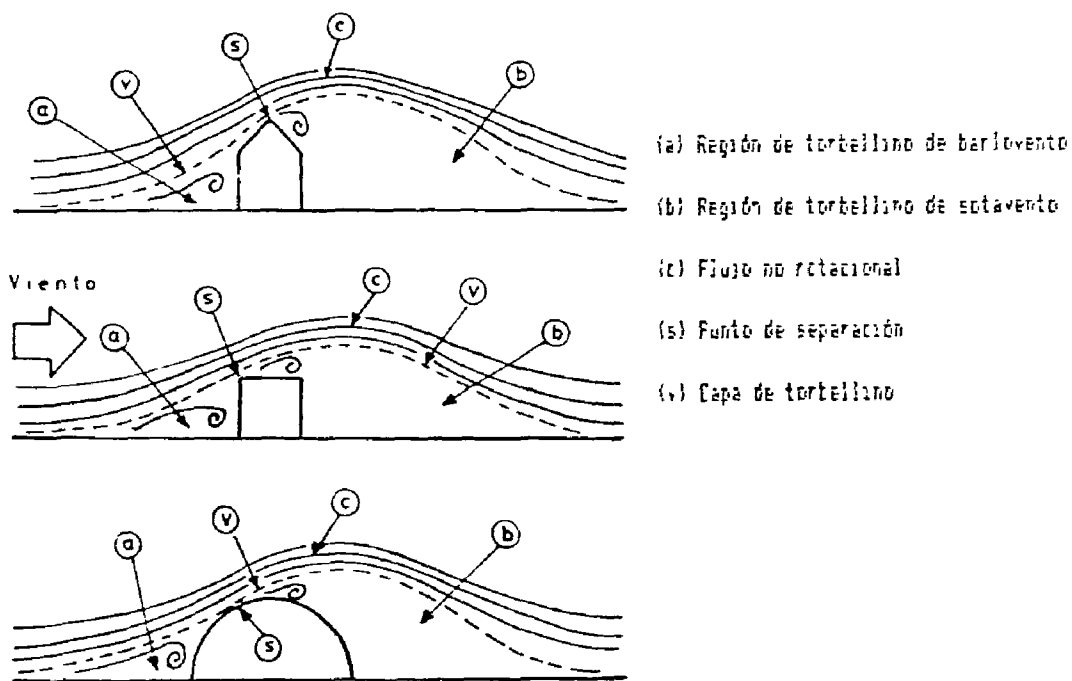


FIG. 10. FLUJO ALREDEDOR DE TRES FORMAS TÍPICAS DE EDIFICIOS

Si la estructura no es hermética, los efectos pueden cambiar debido a la presión interna, dependiendo de si las aberturas están en el lado de barlovento o sotavento. En una estructura con aberturas bastante grandes, el aire interior es sensible al flujo, considerándose en este caso que el viento actúa en la

dirección de las aberturas de barlovento o de sotavento, en vista de que es usualmente imposible predecir la dirección precisa de un viento crítico.

La carga neta o fuerza actuante sobre el techo o muros de un edificio no sólo dependen de las presiones en las superficies externas, sino también de la presión interna. La magnitud de la presión interna depende de la geometría del edificio, tamaño y localización de las aberturas, y velocidad y dirección del viento. Es conveniente expresar las presiones internas como se hizo con las presiones externas; en términos de la presión dinámica y un coeficiente de presión C_{p1} que puede ser positivo o negativo. La presión neta actuante sobre un elemento del edificio es la suma algebraica de las presiones externa e interna [5]:

$$p = (C_{p_e} - C_{p_i}) q \quad (\text{kg/m}^2) \quad \dots\dots\dots (15)$$

donde:

C_{p_e} = Coeficiente de presión externa

C_{p_i} = Coeficiente de presión interna

q = Presión dinámica

De este modo, una presión interna positiva incrementará las cargas sobre aquellas áreas de techos y muros sujetas a succión externa.

La mayoría de listados de factores de forma y recomendaciones, para los efectos tanto internos como externos, son obtenidos de estudio e interpretación de datos experimentales, los cuales son presentados, para uso general, en los códigos de construcción de diversos países. Los valores experimentales de presión promedio y local y coeficientes de forma, están disponibles para una variedad de configuraciones de edificios. Aunque el número de formas posibles de edificios es, obviamente, infinito, es factible hallar predicciones razonables de fuerzas de viento para la mayoría de estructuras, sobre la base de los coeficientes disponibles.

En este trabajo se presenta, en la norma de cargas de viento propuesta, un resumen de factores de forma seleccionados de diversos códigos de construcciones, los cuales pueden ser usados para el diseño de estructuras.

2.4.4 Uso de los Coeficientes de Presión

La presión local en cualquier punto sobre la superficie de un edificio es igual a la presión dinámica q por el coeficiente de presión C_p . Si uno desea la fuerza total sobre un edificio, se puede hacer uso del coeficiente de arrastre C_d , que multiplicado por q da la fuerza promedio por unidad de área en proyección vertical.

Como un ejemplo del uso de los coeficientes con relación a las fuerzas externas sobre los edificios con superficie plana normal al viento, la presión promedio combinada sobre el exterior de la cara de barlovento y sotavento de un edificio típico puede ser: $1.4 q$, de la cual $0.9 q$ es la presión sobre el muro de barlovento y $0.5 q$ la succión sobre el muro de sotavento. El valor 1.4 representa el coeficiente de forma para un edificio típico con muros verticales normales a la dirección del viento.

Por lo tanto: $p = 1.4 q$, donde p es una presión promedio que, cuando se multiplica por el área puesta, da la fuerza total sobre el edificio. Tomando como base la Ecuación 12 o la Tabla II (en la norma), podemos obtener que para una velocidad de 60 km/h la presión dinámica es de 30 kg/m^2 ; por lo tanto, la presión del viento será de 42 kg/m^2 .

Debe indicarse que los valores dados anteriormente para las presiones promedio en el muro, son fuerzas netas sólo en el caso de que el edificio sea hermético (cerrado). Tal condición raramente se presentará. Normalmente, el aire escapa debido a pequeñas aberturas alrededor de ventanas, puertas, tragaluces y aleros, generándose una elevación para una presión interna neta o succión, dependiendo de si las aberturas están mayormente en las superficies de barlovento o sotavento, respectivamente, tal como se

muestra en la Fig. 11. Cuando las aberturas son de tamaño importante, tal como en los hangares, la presión del viento interna puede ser de magnitud significativa.

En el diseño de techos y muros, los coeficientes de presión deberán incluir la suma de las presiones internas y externas para la configuración geométrica particular de la estructura.

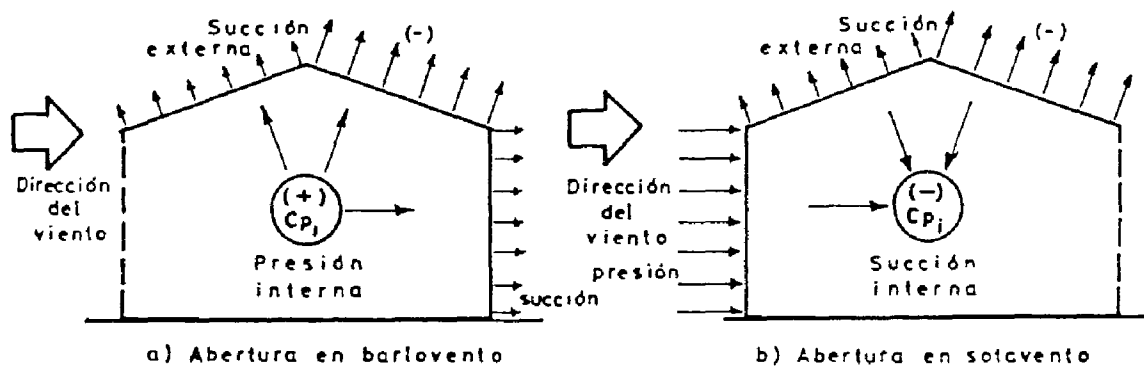


FIG. 11. ACCION DE LA PRESION INTERNA EN UN EDIFICIO TIPICO CON ABERTURAS

2.5 PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR FUERZAS DE VIENTO

El procedimiento para calcular las fuerzas de viento sobre las estructuras es resumido en los siguientes pasos:

1. Seleccionar el adecuado intervalo medio de recurrencia según la Tabla I.
2. Determinar la velocidad básica del viento, para el IMR elegido, de los mapas eólicos 1, 2 ó 3, según el lugar donde estará ubicada la estructura.
3. Con el dato anterior y la Tabla II, obtener directamente

la presión dinámica "q" (kg/m^2), de acuerdo a la altura de la estructura sobre el suelo y teniendo en cuenta que la presión mínima admisible es de $q=15 \text{ kg/m}^2$ para una altura de 10 m. sobre el suelo.

4. Seleccionar los adecuados coeficientes de presión externa e interna de las Tablas respectivas, de acuerdo al tipo de estructura.
5. El factor de ráfaga, para estructuras sensibles, podrá ser incluido según el Art. 11, de la norma propuesta.
6. Calcular la presión de diseño según las ecuaciones siguientes:

$$p = C_p q \quad \text{o} \quad p = (C_{pe} - C_{pi}) q$$

7. Multiplicar el resultado anterior por las áreas de superficie respectivas, para obtener las fuerzas de viento.
8. Sumar apropiadamente las componentes de estas fuerzas para obtener las cargas netas de elevación y arrastre.

2.6 FUERZAS INCONSTANTES DE VIENTO

Las estructuras pueden estar sujetas a oscilaciones de gran amplitud inducidas por el viento, y esfuerzos implicantes severos cuando la amortiguación es pequeña y existen una o más de las siguientes condiciones [2]:

- a. La estructura, o componente estructural, es relativamente flexible o flexiblemente apoyada.
- b. Una fuerza excitante es producida por el viento, y

- c. La sección transversal de la estructura, o componente estructural es tal, que estimula la descarga de torbellinos o manifiesta una elevación inconstante o momento característico; o
- d. La estructura, o componente estructural es libre para oscilar con un modo flexor y un modo torsional simultáneamente. Bajo esta condición, los dos modos pueden acoplarse (unirse) en un movimiento compuesto de ambos y mostrarse como una torsión excéntrica, en la cual el centro de rotación se ha movido viento arriba en un determinado valor, por el esfuerzo relativo del modo flexor; y la frecuencia unida está situada entre la de torsión y la de flexión. Este tipo de movimiento que es conocido como vibración, bajo algunas condiciones puede tornarse bastante violento, alcanzando una amplitud catastrófica en algunos ciclos de oscilación.

Cuando la fuente de excitación toma la forma de una ráfaga, el cambio de velocidad del viento rara vez causa una oscilación significativa, porque el tiempo es usualmente largo con respecto a la frecuencia natural de la estructura. Una posible excepción se presenta con múltiples chimeneas altas libremente levantadas en línea, en las cuales se ha notado que la primera chimenea puede estar en reposo mientras que la segunda en línea puede mostrar fuertes movimientos. Las consideraciones de ráfagas en la selección de la velocidad básica del viento fueron discutidas en la Sección 2.3.3.

La formación de torbellinos puede causar fuerzas alternantes periódicas perpendiculares a la dirección del viento, resultado de la vibración de la estructura. Este fenómeno ha sido repetidamente observado en objetos cilíndricos. Para el ingeniero civil es de particular interés el caso de chimeneas vibrantes.

Determinadas secciones transversales producen pendientes negativas sobre ciertas porciones de las curvas de elevación o momento, graficadas contra el ángulo de ataque del viento, y aún cuando el viento muestre un ángulo de ataque en una dirección, la elevación o efecto de momento pueden actuar en la dirección contraria. Esta condición puede causar movimientos desastrosos en ciertos tipos de puentes colgantes rigidizados con vigas de alma llena.

CAPITULO III

ESTRUCTURAS SUJETAS A OSCILACION POR VIENTO

3.1 INTRODUCCION

Antiguamente el diseño práctico prevalectente dependía totalmente de las cargas estáticas de viento basadas en una fuerza constante arbitraria que, generalmente, ignoraba la forma de la estructura y el valor real de la velocidad y dirección del viento en el sitio.

Cada vez más, la profesión de ingeniería civil se ve forzada a considerar la posibilidad de la respuesta dinámica, inducida por el viento, en ciertos tipos de estructuras flexibles, debido a las excesivas vibraciones y fallas de fatiga que se presentan en algunos casos.

El problema del efecto dinámico del viento sobre estructuras modernas puede dividirse en cuatro categorías principales, dependientes de la forma y flexibilidad de la estructura. Todas estas categorías caen bajo la clasificación de oscilaciones auto-excitadas.

a. Oscilaciones de alta frecuencia pueden ser provocadas en estructuras esbeltas, tales como líneas de transmisión y teléfono, torres con vientos, y algunos tipos de puentes colgantes de traveses rigidizadores, como resultado de la

resonancia (generalmente subarmónica) entre la velocidad de vertimiento del torbellino y alguna frecuencia natural de la estructura.

b. Cuerpos cilíndricos (el término "cilíndrico" se usará para designar un cuerpo cuya sección transversal es la misma a todo lo largo del tramo) mostrando una pendiente negativa sobre ciertas porciones de la curva graficada entre la fuerza de elevación y el ángulo de ataque del viento, pueden oscilar con un modo flexor. Si la estructura es libre de oscilar con torsión y la curva graficada entre momentos y ángulos de ataque del viento muestra una pendiente negativa, indicará la posibilidad de inestabilidad torsional (ver Fig. 12).

c. Planchas delgadas colocadas horizontalmente en un viento horizontal, o el tablero de un puente colgante de traves rigidizadoras, pueden ser sujetas a vibraciones si las frecuencias naturales de flexión y torsión no son demasiado desiguales. La fuerza del viento causa una elevación que actúa excéntricamente, induciendo así un momento de torsión. La unión de estos dos modos puede dar como resultado un movimiento catastrófico.

d. Ha habido algunas ocasiones en que se ha desarrollado una acción de bofetada sobre una estructura, debido al efecto de alguna otra estructura relativamente cercana viento arriba; tal condición ha sido observada en múltiples chimeneas altas colocadas en línea.

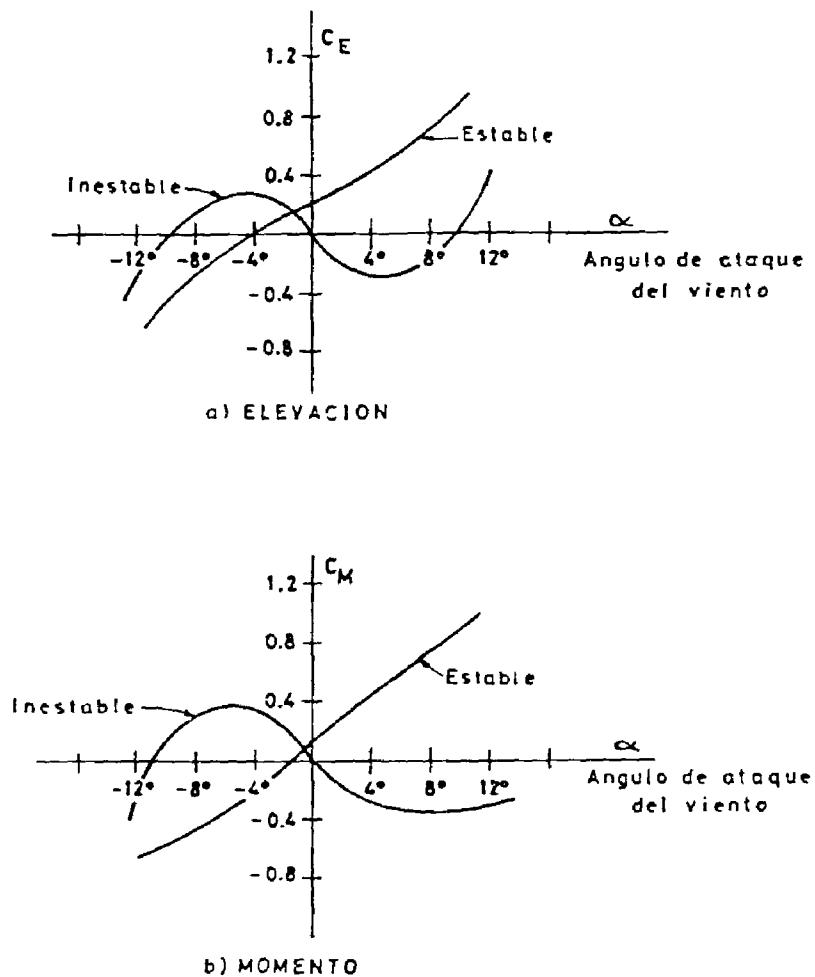


FIG. 12. GRAFICAS DE ELEVACION Y MOMENTO

3.2 OSCILACIONES AUTO-EXCITADAS

La experiencia ha demostrado que las manifestaciones más significativas de oscilación inducida por viento caen en la clasificación de movimiento auto-excitado, que puede ser descrito mediante el siguiente enunciado:

"En una oscilación auto-excitada, la fuerza alternante que mantiene el movimiento es creada o controlada por el mismo movimiento; si el movimiento cesa, la fuerza alternante

desaparece".

En el caso de excitación por torbellino de estructuras, o componentes estructurales, que son libres de oscilar en uno o más modos de flexión o torsión, se pueden establecer los siguientes criterios:

1. Mientras la estructura está en reposo, la frecuencia del torbellino es controlada por el viento.
2. En ciertas velocidades discretas de viento, designadas como "velocidades críticas", la frecuencia del torbellino coincidirá, o será un múltiplo, con una de las frecuencias de movimiento de la estructura; tal coincidencia da por resultado una oscilación auto-excitada.
3. Más allá de las velocidades críticas de viento, la estructura oscilante y no la velocidad del viento controla la frecuencia del torbellino. En tales casos, el rango de oscilación se extiende sobre ciertos rangos finitos de velocidad de viento. El límite más bajo de cada rango es la velocidad crítica. El límite más alto no es tan bien definido como la velocidad crítica. Sin embargo, entre el límite superior y la velocidad crítica inmediata, la estructura estará prácticamente en reposo.

Cuando la frecuencia del torbellino coincide con una frecuencia natural de la estructura, dará como resultado

una excitación armónica. Si la frecuencia del torbellino es un múltiplo de una frecuencia natural de la estructura, la excitación resultante será subarmónica.

En estructuras muy flexibles, tales como puentes colgantes de traveses rigidizadores, algunos de los modos de flexión más bajos pueden desarrollarse al doble, pero con la misma frecuencia. La primera aparición será excitada armónicamente, mientras que la segunda aparición será de origen subarmónico. El modo torsional muestra también dos apariciones con la misma frecuencia. La primera es armónica y la segunda es subarmónica. Sin embargo, la segunda aparición puede ser catastrófica y suprime el desarrollo de cualquier otro modo, excepto los dos o tres modos flexionantes más bajos.

Bajo condiciones de amortiguación muy baja, lo cual sólo puede conseguirse en el laboratorio, pueden desarrollarse más de dos apariciones de un modo torsional para ciertas formas de sección transversal.

3.3 VERIFICACION EXPERIMENTAL DE LA EXCITACION POR TORBELLINO

Las investigaciones realizadas para comprobar la estabilidad aerodinámica de un puente colgante, mediante un modelo rígido de sección H soportado sobre resortes (Fig. 13), demostraron que las oscilaciones son resultado del vertimiento del torbellino, observándose también que existe una relación lineal entre las frecuencias y las velocidades con que inician el movimiento. Asimismo, se realizaron un

número de experimentos en los que se varió la constante de los resortes para determinar esta relación entre frecuencia y velocidad crítica del viento. La velocidad crítica del viento v_c es aquella velocidad después de la cual existe un movimiento finito [2].

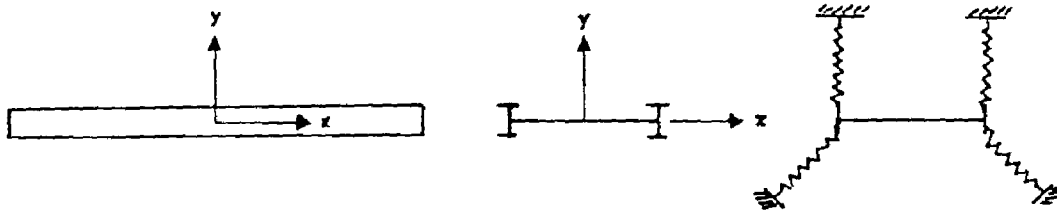


FIG. 13. MODELO DE ESTRUCTURA SUSPENDIDA

Los experimentos indicaron que ni bien empieza el movimiento vertical (el modelo se mueve verticalmente), la frecuencia del torbellino tiene un valor constante bien definido, es decir, el modelo controla la frecuencia del torbellino. Cuando la velocidad es incrementada, se alcanza un punto en el cual el modelo ya no es capaz de controlar la frecuencia del torbellino y el viento, otra vez, se convierte en el factor que controla.

Similarmenete, en oscilaciones torsionales, la frecuencia del torbellino también llega a ser constante a medida que comienza el torbellino pero, en este caso, cambia repentinamente a un valor más alto conforme la velocidad del viento excede ciertos límites.

Con velocidades de viento más altas, el ciclo de desarrollo

del modo fue repetido con una amplitud grandemente incrementada en el modo vertical y una segunda apariencia catastrófica del modo torsional.

3.4 MECANISMO DE VERTIMIENTO DEL TORBELLINO

Cilindros Circulares. Por encima de $R = 25,000$, la estela se torna turbulenta en el punto de separación. En este rango, el vertimiento del torbellino es periódico, pero las velocidades fluctúan de una manera irregular debido a la turbulencia del flujo. Como consecuencia, las magnitudes de las fuerzas de elevación oscilantes son algo casuales y llegan a ser más. de esta manera, con números de Reynolds crecientes.

El valor $R \approx 3 \times 10^5$ es el número de Reynolds crítico; los valores bajo este número son llamados subcríticos y los números más altos son denominados supercríticos.

Un número significativo de chimeneas altas han oscilado con el viento y algunas sufrieron daños catastróficos. Todas estas estructuras fueron de sección transversal circular, con diámetros por encima de los 5.50 metros. Todas oscilaron en el rango supercrítico, pero generalmente de una manera errática e irregular y siempre con su frecuencia natural más baja. Sus comportamientos indicaron, además, que a pesar del vertimiento no periódico de los torbellinos, con valores de $R \approx 11 \times 10^6$, los procesos en la estela son esencialmente inalterados con números de Reynolds superiores al crítico.

Cilindros con bordes agudos. Cuando un cilindro tiene bordes agudos que fijan el punto de separación del torbellino, el proceso regular de vertimiento del torbellino es independiente del número de Reynolds superior a $R \approx 10^5$.

Efecto del redondeamiento de los bordes agudos. En general, el efecto del redondeamiento de los bordes agudos tiende a provocar una región subcrítica de R ; pero hasta que la razón de radio de esquinas a la dimensión transversal entre bordes exceda un valor de 0.20, el efecto de redondeamiento de esquinas no es significativo.

Oscilación modificante excitada por el viento. Muchas de las situaciones en que las oscilaciones inducidas por viento son de carácter serio han involucrado secciones transversales circulares. Se examinará tres dispositivos descubiertos, dos de los cuales fueron establecidos como efectivos para aplicarlos sobre estructuras existentes.

Antes de estos descubrimientos sólo dos dispositivos fueron conocidos:

1. Alteración del diseño para incrementar la frecuencia natural de la estructura, aumentando de este modo la velocidad crítica del viento a un nivel superior al que se espera en el sitio.
2. Incremento de la amortiguación efectiva a través de la instalación de dispositivos de amortiguación mecánica.

que funcionan para reducir la amplitud.

En la práctica, los dos métodos son generalmente insatisfactorios, porque los beneficios son probablemente del todo limitados. Esto es especialmente cierto cuando se involucra un incremento de amortiguación, ya que los beneficios sólo pueden lograrse mediante sistemas auxiliares elaborados, que son prácticos solamente en estructuras levantadas libremente, tales como chimeneas altas.

En 1956 [2], se revela los resultados de una amplia investigación; usando un anillo de refuerzo circular perforado que circunda un miembro cilíndrico. Los túneles de viento experimentales comprobaron que el anillo de refuerzo es efectivo eliminador de vibraciones con valores subcríticos y transitorios (mayores que $R = 4 \times 10^5$) del número de Reynolds (ver Fig. 14 a).

Un aspecto sorprendente en relación al efecto de las posiciones del anillo de refuerzo es el hecho de que fuera drásticamente reducido el arrastre en el rango transitorio de R y que, por otro lado, para tres diseños de anillos de refuerzo con diferentes combinaciones de abertura del anillo y diámetro de los orificios, permaneció constante el arrastre en el rango supercrítico, hasta el límite de velocidad de viento disponible.

Cualquiera de los tres anillos mencionados probaron ser efectivos suprimiendo la excitación del torbellino con

números de Reynolds subcríticos, transitorios y supercríticos, y virtualmente eliminaban las oscilaciones periódicas de un modelo rígido (inflexible), con números de R transitorio y supercrítico.

En 1957 se publicaron los resultados de una investigación experimental donde se revela que se lograron los mismos resultados anteriormente descritos, pero que prometían ser más aceptables sobre miembros de todo tamaño y longitud, de sección transversal circular y aplicables también a miembros cónicos.

Esta investigación involucraba el uso de planchas helicoidales, que son espirales alrededor del cilindro circular. Estas espirales son de sección transversal rectangular y su eficiencia depende de la cantidad de las planchas helicoidales, su altura sobresaliente y su paso de arrollamiento (ver Fig. 14 b).

Estudios más detallados ampliaron la investigación original, proponiendo una colocación óptima de tres hiladas de planchas helicoidales con un paso de arrollamiento de $5D$ y un alto de $0.09D$.

Otras investigaciones, durante el año 1959, completan el estudio de la eficiencia de los espirales, pero con sección transversal circular adaptados a cilindros. El propósito del estudio fue la evaluación de este tipo de espiral circular como medio de eliminación del movimiento inducido

por el viento sobre miembros tubulares de aluminio en antenas de radar, con estructura espacial, en las cuales ocurrían pesivas vibraciones y fallas de fatiga.

Estas investigaciones confirmaron los descubrimientos hechos con anterioridad, pero a través del uso de espirales de sección transversal circular que conformaban la estructura de la antena. Se reveló también que dichos espirales no necesitaban ser aplicados sobre la longitud total, si la oscilación se restringía para el modo fundamental (el modelo se mueve verticalmente como una unidad). Se concluyó también que las espirales de sección transversal circular fueron más efectivas con cuatro vueltas. El diámetro de espiral más efectivo fue establecido como $3D/12$. El paso óptimo fue de $12D$.

Estas investigaciones ofrecen la primera solución práctica, con precisión, para el problema de vibración inducida por torbellino sobre estructuras de sección transversal circular. sin embargo, se notó que las espirales de sección transversal circular no son efectivas en el rango supercrítico del número de Reynolds.

Las planchas en espiral de sección transversal rectangular han sido aplicadas, con buenos resultados, para chimeneas cónicas de acero que oscilaban con el viento. Parece que este tipo de espirales son efectivos con números de Reynolds supercríticos a consecuencia de los bordes agudos que presentan las planchas en espiral.

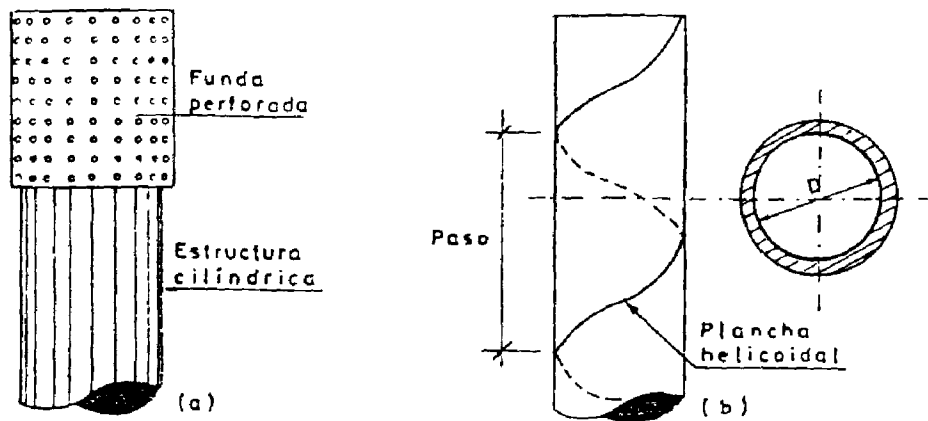


FIG. 14. DISPOSITIVOS PARA LA ELIMINACION DE VIBRACIONES CAUSADAS POR EL VIENTO EN ESTRUCTURAS CILINDRICAS

3.5 OSCILACION DE BOFETADA

La oscilación de bofetada puede desarrollarse cuando una estructura está ubicada en la estela de una obstrucción que vierte un rastro de torbellino en forma más o menos regular. La obstrucción puede proceder de la topografía de la zona, pero más frecuentemente toma la forma de otra estructura; o, en estructuras complejas, un elemento de la estructura puede llegar a ser la causa de una acción de bofetada sobre otra porción viento abajo.

La acción de bofetada es generalmente irregular, resultante de las cortas explosiones de amplitud, y rara vez ha sido catastrófica, excepto en el caso de algunos componentes de máquinas de volar.

Una manifestación interesante de estos fenómenos fue observada en el caso particular de dos chimeneas altas

colocadas en línea, donde el torbellino de la chimenea 1 pudo alcanzar la cara opuesta de la chimenea 2, justo cuando un torbellino es separado de esta chimenea. El torbellino efectivo de la chimenea 1, siendo de rotación opuesta a aquella que descarga la chimenea 2, causa un efecto neutralizante. Esto da por resultado un torbellino efectivo descargado desde sólo una cara de la chimenea, generando, consecuentemente, una fuerza periódica.

3.6 FACTORES QUE CONTROLAN LA CONDUCTA DE UN PUENTE COLGANTE EN EL VIENTO

Las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un puente con el viento dependen sólo de la velocidad y dirección del viento, así como del tamaño, forma y movimiento del puente.

Comportamiento de una Sección de Trabe Rigidizadora. En todos los experimentos con modelos oscilantes de secciones de traveses rigidizadoras, excepto en traveses extremadamente bajas, el movimiento ha sido con un modo vertical puro o con un modo torsional puro, de acuerdo con la frecuencia natural de vibración, esencialmente.

La característica dominante del comportamiento de un puente con el viento es la relación consistente entre la frecuencia N (en ciclos por segundo) de oscilación de la estructura y la velocidad (en m/seg) del viento que causa ello. Los detalles como las alas de las traveses, los durmientes longitudinales, los bordes de la acera y la

posición del tablero con respecto a las travesas, también tienen influencias modificatorias importantes. Estas influencias de los detalles no son siempre predecibles.

Las secciones de travesas se caracterizan porque pueden oscilar en amplitudes restringidas con velocidades moderadas de viento y con una variedad de modos sucesivos y frecuencias correspondientes cuando cambian las velocidades. En general, dependiendo de la forma, los modos tanto vertical como torsional pueden reaparecer con velocidades altas (pero con sus frecuencias características), y algunas de éstas pueden ser catastróficas.

Comportamiento de Secciones de Vigas de Celosía Rigidizadoras. Todas las oscilaciones observadas en este tipo de modelos de puente han sido del tipo par. Frecuentemente, los modos aparentan casi una torsión pura, pero la frecuencia es reducida alrededor de aquella que corresponde al modo vertical. En muchos casos, la componente del modo vertical tiene suficiente amplitud como para desviar considerablemente el eje de rotación hacia viento abajo de la línea central de la estructura. En algunos casos ha estado prácticamente en el barlovento de la estructura de celosía, o bien más allá de él.

Es característico que ocurran oscilaciones de tipo perezadas, con velocidades considerablemente más altas que aquellas necesarias para los tipos vertical y torsional puro, en las secciones de vigas. Es claro también que las

fuerzas aerodinámicas sobre la sección de la viga de celosía rigidizadora, son determinadas primeramente por la cubierta y los miembros de celosía adyacentes a ella. En experimentos con modelos, la eliminación del cordón inferior y miembros del alma de una sección armada de la cubierta han afectado sólo liberamente el movimiento. Estos miembros son aerodinámicamente beneficiosos a causa de que aumentan en algo la amortiguación aerodinámica.

En vista de que el movimiento parecido requiere de una combinación de los movimientos vertical y torsional, en cierto modo excitados mutuamente bajo la acción del viento, ésta dependerá de los factores elásticos influyentes en las frecuencias relativas de los modos vertical y torsional. El uso de sistemas laterales en los planos de los cordones superior e inferior, incrementan la rigidez torsional y, por lo tanto, pueden así separar mucho las frecuencias vertical y torsional a fin de que la velocidad crítica de unión y de las vibraciones, disminuyan más allá de cualquier velocidad probable del viento.