

## Efecto de la resonancia en el diseño por viento de estructuras flexibles de anuncios espectaculares

### *Resonance effect in wind design of flexible structures*

Raúl González-Herrera<sup>1</sup>  
Jorge A. Aguilar-Carboney<sup>2</sup>  
María Alejandra Borraz-Santiago<sup>3</sup>  
Carlos Narcía-López<sup>1</sup>  
Janio Alejandro Ruiz-Sibaja<sup>2</sup>

#### RESUMEN

La respuesta dinámica de las estructuras flexibles bajo el efecto de ráfagas intensas de viento ha sido poco estudiada en Chiapas; sin embargo, su estudio es muy necesario debido a que la falta de éste ha provocado que recientemente las estructuras flexibles y espectaculares hayan presentado daños importantes tras ráfagas de viento significativas en la ciudad, e incluso menores a las especificadas en el Manual de Obras Civiles de CFE para el diseño de estructuras por viento. En este artículo presentamos, como producto de nuestra investigación de los daños recientes en estructuras locales y del análisis de las consideraciones de diseño por viento de distintos reglamentos, una metodología que emplea modelos analíticos y espectros de velocidad sintéticos de viento que permiten establecer las fuerzas de diseño estáticas equivalentes promedio, de fondo y de resonancia, mediante las cuales se pueden determinar las deformaciones que producen en estructuras flexibles tales como espectaculares, y de esta forma poder diseñarlas con una mayor seguridad.

**Palabras clave:** respuesta dinámica, resonancia estructural, diseño por viento, estructuras flexibles de acero.

#### ABSTRACT

The dynamic response of flexible steel or wood structures under the effect of intense wind has not been studied in Chiapas; however, its study is very necessary since recent important damages in flexible steel structures have appeared in the city after significant gusts of wind and even under smaller demands to the specified ones in the CFE Manual of wind design. In this paper we consider our research about recent damages in local structures and the considerations of wind design of different codes. It presents a methodology that uses analytical models and synthetic velocity wind spectrums that allow establishing design forces, using means of static average, bottom forces and resonance forces to find out the structures deformations in order to obtain a safe design.

**Key words:** dynamic response, structural resonance, wind design, steel structures.

#### INTRODUCCIÓN

En la ingeniería civil y estructural de nuestro país se ha trabajado desde el sismo de 1985 en el diseño dinámico por fenómenos sísmicos, pero pocos investigadores se han adentrado al fenómeno del viento y sus efectos dinámicos en estructuras flexibles. Lo anterior es debido mayormente a que este último afecta principalmente a estructuras de acero o madera, las cuales no suelen ser el sistema constructivo de mayor empleo en nuestro país, lo cual también se refleja en los sistemas constructivos empleados en Chiapas. No obstante la presencia de estructuras metálicas ligeras en estructuras como anuncios espectaculares, torres de transmisión o viviendas de madera en zonas rurales o en áreas no regularizadas de las ciudades, es cada vez más recurrente y debido a que no tienen diseños adecuados, se incrementan los daños potenciales que se presentan en estos sistemas constructivos.

El viento es un flujo de aire producto de la diferencia de presiones que surge del gradiente de temperatura entre masas de aire caliente y frío. Las pérdidas económicas en la década de los 90 en todo el planeta, producto de fenómenos intensos de viento e inundaciones, fue en conjunto 55% de los todos los daños ocurridos, de los cuales el viento provocó 34% de las muertes y 24% de las pérdidas señaladas, según lo reporta la Universidad de Luvaina, Bélgica, citada por López y Toledo (2003).

Los vientos que interesan para los fines de este estudio por su efecto en las ciudades y construcciones, así como en la protección civil, son aquellos que se presentan en la biosfera, los cuales conocemos como vientos de superficie cuya trayectoria es alterada por las construcciones y la rugosidad de la superficie, volviéndose un flujo turbulento con presencia de vórtices alternantes de presión y succión, muchas veces tan erráticos que no sabemos a ciencia cierta adónde van o de dónde vendrán.

<sup>1</sup> Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Facultad de Ingenierías, Libramiento Norte Poniente No. 1150, Colonia Caleras Maciel, Ciudad Universitaria, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Correos-e: ingeraul@yahoo.com y narcia\_lopez@yahoo.com

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Ingeniería, Boulevard Belisario Domínguez Km #1081, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Correos-e: jaguilar@unach.mx y ruizsibaja@yahoo.es

<sup>3</sup> Consultora privada, Pistache # 203, Fraccionamiento Monte Real, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Correo-e: aborraz@hotmail.com

Para el diseño por viento resulta importante conocer cuáles son los patrones de flujos de viento tanto en época de calma (flujo laminar) como cuando se presentan ciclones (flujo turbulento). Los meteorólogos han establecido patrones de trayectorias probables para distintas velocidades de viento, a esta información sobre la distribución espacial del viento durante un meteoro se le da el nombre de campo de vientos (Rosengaus, 1998). La máxima velocidad sostenida es el índice de intensidad de estos fenómenos para la revisión de la estructura ante estos eventos, pero no obstante que se indica como un solo valor, no se trata de un valor constante ni uniforme en el tiempo ni el espacio.

Los valores empleados para este trabajo son los obtenidos de ciclones tropicales, huracanes y/o tifones, palabras que son sinónimas. La palabra "huracán" es de origen maya y era la denominación que hacía esta cultura a su dios del trueno y los vientos. La palabra "tifón" es de origen oriental y significa gran plataforma de los vientos (López y Toledo, 2003).

La magnitud señal de viento empleada está relacionada con el peligro que afectará a la zona estudiada, información que se expresa mediante un espectro de velocidades de viento. Desafortunadamente, en Tuxtla Gutiérrez no se cuenta con suficientes datos, por lo cual se produjeron señales sintéticas a partir de registros de velocidades menores que son las que se tienen registradas en la estación ubicada en la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, en el Libramiento Norte Poniente de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, la cual opera con regularidad desde el año 2007.

No obstante, en la literatura son recurrentes los casos citados por Ambrose y Vergun (2003), donde daños importantes en estructuras flexibles fueron ocasionados por efectos de viento a bajas velocidades, los cuales generan señales armónicas y resonancia en la estructura generando vibración y desplazamiento importante al sincronizarse la velocidad del viento y el período natural de vibración de la estructura.

Sordo (2006) señala que el daño por fuertes vientos asociados a resonancia en estructuras flexibles es más frecuente (espectaculares, construcciones de madera, semáforos, etcétera), pero enfatiza que el factor determinante en el grado del daño es debido al nivel del amortiguamiento de la estructura, el número y dimensiones de los vórtices alternantes que desprenda

la arquitectura de la estructura analizada y las estelas que generan las estructuras vecinas.

Baeza, Vargas y Pérez (2004) presentan un interesante catálogo de daños en espectaculares en Mérida, Yucatán, debidos a vientos huracanados registrados en el año 2002 por el huracán "Isidoro", los cuales clasifican en los siguientes: 1. De la misma mampara, 2. De la conexión mampara-pedestal, 3. Del pedestal, 4. De la conexión pedestal y placa de base, 5. De la placa de base con la cimentación, 6. De las anclas con la cimentación y 7. De la cimentación.

En su artículo, Baeza, Vargas y Pérez (2004) argumentan que no obstante que el análisis estructural de un espectacular puede considerarse trivial al tratarse de una viga isostática, no así el diseño estructural (detallado de los elementos) y mucho menos la determinación de las fuerzas de análisis; sin embargo, el poco estudio de lo anterior ha generado muchos daños en diversas regiones del país. Pese al buen diseño y construcción que pudieran tener estas estructuras se deben considerar también factores como la corrosión, el daño acumulado, los esfuerzos residuales, el gradiente térmico, entre otras, los cuales incrementan su vulnerabilidad, además de los requerimientos de mantenimiento de este tipo de estructuras por parte de los propietarios y de las autoridades.

Otro elemento importante en el estudio es la vulnerabilidad de las estructuras flexibles sometidas a vientos intensos (susceptibilidad de daño esperado de las estructuras analizadas por efecto de la variabilidad de las cargas y el cambio de intensidad de éstas) y por último la extensión del campo de los vientos que delimita la densidad de daño esperado en una población.

López y Toledo (2003) desarrollaron un estudio nacional considerando distintas estructuras sensibles a vientos intensos, principalmente viviendas de madera o mampostería sin refuerzo; de acuerdo con el estudio ubican al estado de Chiapas con una vulnerabilidad de tres (media), siendo el número cuatro el valor máximo representado en el mapa mediante un color gris muy intenso y la más baja susceptibilidad es de uno y se colocó con color blanco; este mapa se ubica en la Figura 1.

Los objetivos del presente trabajo se centran en establecer una propuesta de metodología que permita evaluar los efectos del desplazamiento en las estructuras flexibles (espectaculares o mamparas) debidos a las fuerzas dinámicas de viento: estática, de fondo y resonante, la cual se



**Figura 1.** Mapa de susceptibilidad y densidad de daño esperado debido a vientos fuertes para cada estado de la República Mexicana, elaborado por López y Toledo (2003).

presenta como una propuesta para impulsar una revisión con mayor detalle de estas estructuras que proliferan en la ciudad y que cada día presentan mayores daños.

### **Efectos de fuerzas de viento en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

El Reglamento de Construcción de Tuxtla Gutiérrez (RCTGZ-2004) señala en su artículo 370 que el H. Ayuntamiento expedirá normas técnicas para diseño por sismo o viento, las cuales a la fecha no existen. El análisis por viento de las construcciones en Chiapas se realiza principalmente de acuerdo con alguna propuesta normativa nacional, ya que en nuestro estado se carece de una normativa técnica propia en materia de diseño estructural por viento; aunque, como se mencionó, se cuenta con un reglamento de construcción (RCTGZ-2004) que en su artículo 377 señala que en casos especiales y por las dimensiones y geometría de las estructuras, solicita una memoria de cálculo estructural avalada por un director responsable de obra que pertenezca a un colegio o sociedad técnica local.

Las dos propuestas de normas técnicas más empleadas para el diseño por viento en el estado de Chiapas son las dos siguientes:

1. Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Viento del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, cuya última versión corresponde al año de 2004 (NTCV-RCDF-2004).

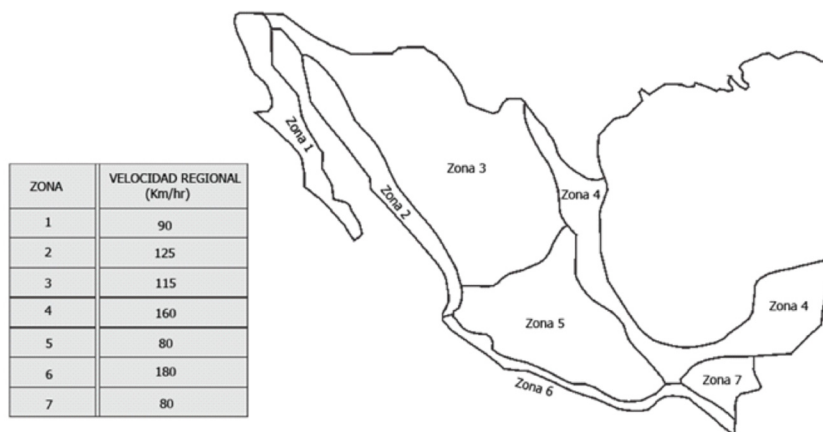
2. Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad, Diseño por Viento de 1993 (MOC-CFE-DV-1993). Este manual tiene una actualización reciente que tiene una nueva filoso-

fía de diseño, sus primeros ejemplares salieron en el año 2008, sin embargo no se emplean aún en la ciudad.

La primera normatividad técnica es la más empleada, a pesar de que está condicionada a una ciudad con características físicas muy distintas de las ciudades del estado de Chiapas, pero tiene la ventaja de que su empleo es más sencillo. La segunda norma es una propuesta nacional con procedimientos más complejos y detallados. El RCTGZ-2004 señala en su artículo 406 que la velocidad de diseño por viento para la ciudad capital y sus alrededores es de 80 km/h, velocidad que corresponde con velocidades similares con las regionalizaciones expuestas en la Figura 2, las cuales son extraídas del MOC-CFE-DV-1993.

Según la regionalización presentada por MOC-CFE-DV-1993 (véase Figura 2), es la zona 7 donde ubicamos a Tuxtla Gutiérrez y la velocidad correspondiente es de 80 km/h, mientras que para la nueva versión del MOC-CFE-DV a cargo del Instituto de Investigaciones Eléctricas presenta un mapa con isotacas, donde para Tuxtla Gutiérrez la velocidad de diseño está de entre 100 y 142 km/h (véase la Figura 3). La disparidad de datos que las figuras 2 y 3 presentan, se debe principalmente a que son mapas elaborados para distintos periodos de retorno y considerando o no el efecto de los vientos huracanados. Sin embargo, el MOC-CFE-DV desde 1993 presentaba una tabla para un rango de velocidades desde 90 y hasta 141 Km/h para periodos de retorno desde 10 y hasta 2,000 años.

El incremento encontrado en las velocidades de viento propuestas por las distintas instancias



**Figura 2.** Mapa de regionalización de velocidades mínimas de viento para diseño MOC-CFE-1993.

técnicas (CFE y SMN), la falta de estudios regionales específicos para las distintas ciudades de Chiapas, así como la inexistencia de normas de diseño propias y para Tuxtla Gutiérrez y la nula definición de cuál norma técnica se debe emplear han provocado, en el mejor de los casos, que los diseñadores de la ciudad utilicen eventualmente el MOC-CFE-DV-1993 o, aun mejor la nueva versión MOC-CFE-DV-2008, que es un manual técnico auxiliar, pero no normativo. Debido a lo anterior se han presentado recientemente daños en estructuras mal diseñadas, o incluso sin diseño estructural previo, ya que sólo hasta dos años se solicita la memoria de cálculo de los anuncios espectaculares.

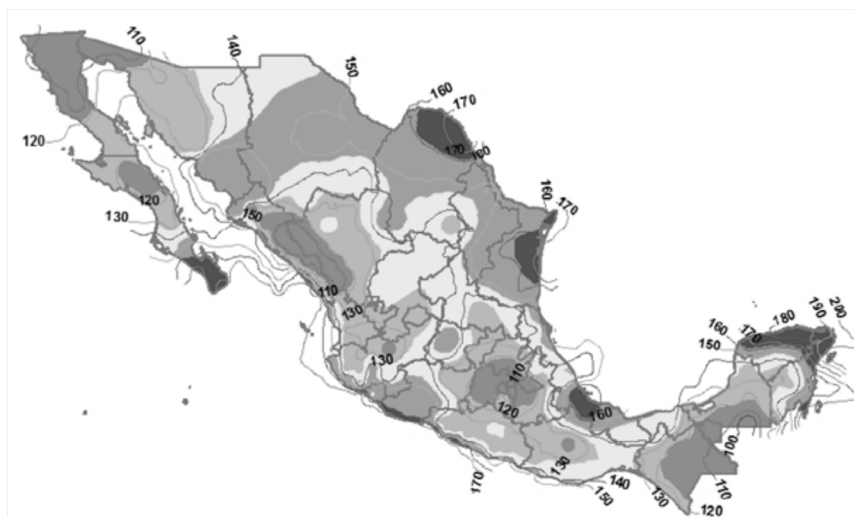
En las figuras 4a y 4b se presentan ejemplos de daños recientes en Tuxtla Gutiérrez, los cuales sirvieron para que Protección Civil y Obras Públicas Municipales señalaran que han

inspeccionado alrededor de 200 espectaculares en Tuxtla Gutiérrez, de los cuales alrededor del 70% presentan falta de mantenimiento manifestada por deformaciones excesivas y corrosión<sup>i</sup>. Pero no sólo los espectaculares han presentado problemas, también semáforos y árboles se han caído<sup>iii</sup>. En el norte del estado y en la zona Costa las ráfagas de viento han destruido casas de madera y otras estructuras flexibles<sup>iv, v</sup>.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Supuestos teóricos

Para el presente estudio se realizó el análisis de un espectacular típico de los centros comerciales pequeños y gasolineras, construidos en la ciudad capital (véanse las figuras 5a y 5b), cuyas dimensiones y materiales fueron conside-



**Figura 3.** Mapas de isotacas para la República Mexicana contemplando un período de retorno de 50 años, para una altura de 10 m, para terreno categoría 2, en un lapso promedio de 3 s. (López y otros, 2008).



**Figura 4a.** Daño a espectacular de cadena transnacional de comida rápida, ubicada en Boulevard Belisario Domínguez, en la zona norte poniente de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas durante el año 2007.



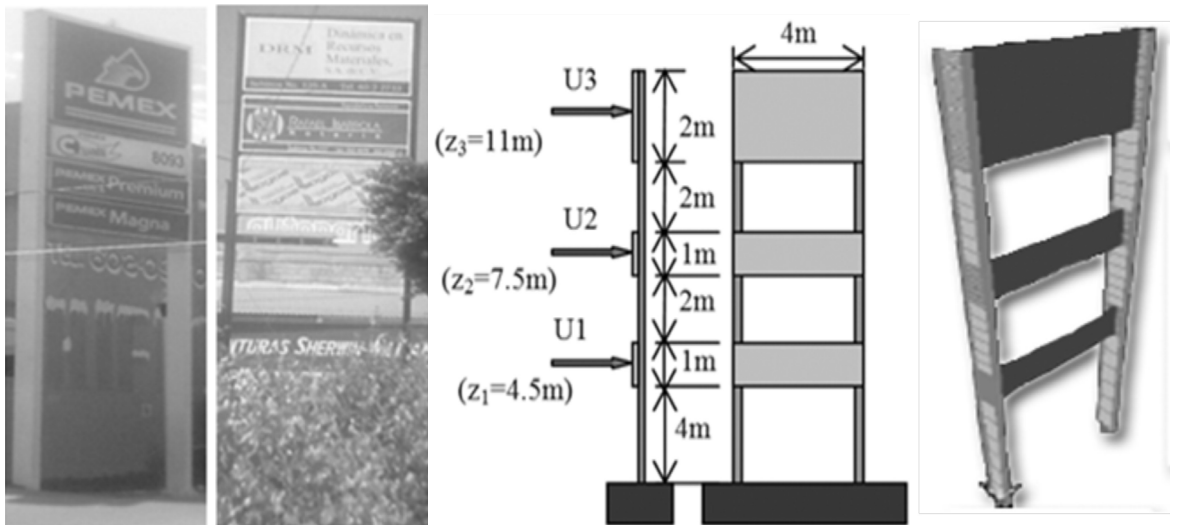
**Figura 4b.** Daño a estructura de espectacular ubicado en lo alto de un edificio en el Boulevard Belisario Domínguez, en la zona norte poniente de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas durante el año 2009.

rados de manera similar para el proyecto. En la Figura 5c se muestra el modelo de espectacular seleccionado mediante un esquema con cotas y dimensiones, y en la Figura 5d se muestra el modelo del espectacular elaborado con el programa de análisis estructural SAP2000 en su versión 10.0.4 correspondiente al año 2007. La selección de este tipo de espectaculares obedeció a que su nivel de vulnerabilidad es menor que aquel que tiene un solo pedestal (esta afirmación se basa tan sólo en la idea de redundancia estructural) y que por las características del tipo y uso de la construcción a la que pertenecen (gasolineras y pequeños centros comerciales), deberían contar con un diseño adecuado, por lo que los resultados que se obtengan fortalecen la

hipótesis de emplear mejores metodologías para obtener las fuerzas de diseño y la revisión de las deformaciones por condiciones dinámicas.

Para el análisis del sistema estructural, se generó un modelo matemático plano del sistema en cuestión, en el cual sus miembros fueron colocados con elementos tipo barra. Las características de dichos elementos permiten estimar de forma razonable el comportamiento de la estructura ante solicitaciones permanentes y accidentales durante su vida útil. Los elementos utilizados emplean una formulación plana, la cual considera simultáneamente flexión axial, torsión y deformación axial por cortante.

Se emplearon tres espectros sintéticos de velocidad de viento para la ciudad, debido a que



a. Ejemplo uno del espectacular.

b. Ejemplo dos del espectacular.

c. Dimensiones del espectacular, siendo  $U_i$ , la velocidad respecto al nudo y  $z_i$ , la altura del nudo.

d. Modelo de elementos finitos del espectacular en SAP2000 v 10.

**Figura 5.** Ejemplo de espectacular seleccionado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, ubicados en la 5a. Avenida Norte Poniente, que incluye un esquema con dimensiones y el modelo del espectacular obtenido con un programa para análisis y diseño estructural.

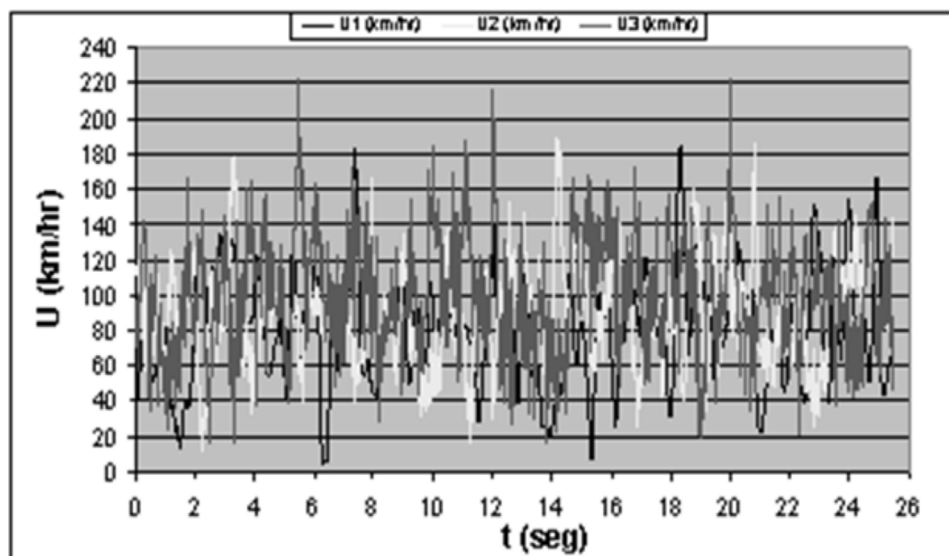
éstos correspondían a las velocidades de los distintos períodos de retorno estudiados y resultaron del análisis de frecuencias de distintas señales de viento, las cuales de origen se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional para Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (fueron proporcionados por el Dr. Emilio Sordo durante el curso de ingeniería eólica) y se escalaron con un factor de aproximadamente dos veces, ya que ese factor nos permitió lograr los valores medios de las velocidades de 80, 90 y 106 km/h, mismas que corresponden a la del RCTGZ-2004 y a las velocidades del MOC-CFE-DV-1993, que se mantienen en el MOC-CFE-DV-2008 para períodos de retorno de 10 años y 50 años, respectivamente (los períodos de retorno señalados son los recomendados para el tiempo de vida, velocidades de diseño y características de los espectaculares, siendo el de 50 años más “conservador” con lo que se obtienen estructuras menos flexibles, pero con detallado más dúctil), estas señales se observan combinadas en la gráfica de la Figura 6.

Como se muestra en la Figura 6, la señal está constituida por un conjunto de bajas frecuencias que generan vórtices mayores para el rango comprendido en  $nB/U > 0.01$  (siendo  $nB$  un parámetro relacionado con la relación de aspecto y  $U$  con la velocidad) y de manera inversa altas frecuencias generan vórtices pequeños para  $nB/U > 1$ . Las frecuencias que predominan en el espectro determinan las características de la señal y el efecto sobre las construcciones. En la Figura 7 se presenta el comportamiento del flujo tur-

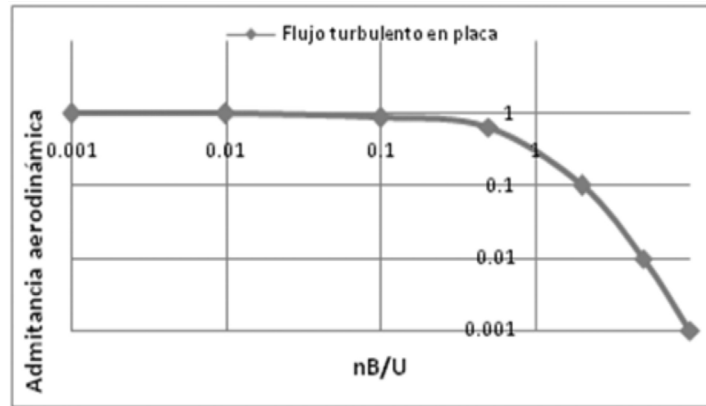
bulento sobre placas cuadradas o rectangulares (similares a las empleadas en espectaculares o mamparas), con relación ancho-largo cercano a uno, el cual depende de las dimensiones del obstáculo y del ángulo de incidencia.

El método empleado para la revisión de los efectos dinámicos del viento en las estructuras es el propuesto conceptualmente por Davenport (1963) y citado por Holmes (2001), ya que es uno de los métodos más robustos en su propuesta de análisis de flujos turbulentos; sin embargo, es uno de los más transparentes en su manejo (véase Figura 8). Este enfoque es espectral que considera la frecuencia de las estructuras y se basa en procesos aleatorios estacionarios, debido a la premisa de que no se pueden describir o predecir en forma precisa los efectos dinámicos del viento en una estructura, además de la complejidad del fenómeno.

Según el esquema del modelo de Davenport (1963) citado por Holmes (2001), para realizar un diseño o revisión de una estructura se debe iniciar a partir de una señal de velocidad (la cual, para nuestro caso, es una señal modificada, señal sintética), misma que se puede expresar a través de procesos matemáticos en una curva de densidad de ráfaga; a partir de dicha curva y apoyados en funciones matemáticas, se logra desarrollar curvas de densidad espectral aerodinámica y/o curvas de la densidad espectral de la respuesta. Estas funciones matemáticas y físicas son la admitancia aerodinámica y la mecánica, de las cuales se puede obtener finalmente la



**Figura 6.** Espectro sintético de velocidad de viento para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, elaborado para cubrir los requerimientos del RCTGZ-04, del MOC-CFE-DV-1993 y MOC-CFE-DV-2008.



**Figura 7.** Comportamiento del flujo turbulento sobre placas cuadradas o rectangulares con relación largo-ancho cercano a uno, gráfica tomada de Sordo (2006).

respuesta a partir de una densidad espectral. Las admitancias son constantes alrededor de la respuesta resonante, con valor asociado a la frecuencia natural del sistema.

El diseño tradicional por viento ha considerado cargas estáticas equivalentes, que se obtienen mediante las ecuaciones (1) RCDF-NTC-DV-2004 y (2) MOC-CFE-DV-1993, las cuales son similares para el MOC-CFE-DV-2008.

$$P_o = 0.0048 * C_p * V_D^2 \quad (1)$$

Siendo:  $C_p$  es el coeficiente local de presión y  $V_D$  la velocidad del viento.

$$q_x = 0.0048 * G * V_D^2 \quad (2)$$

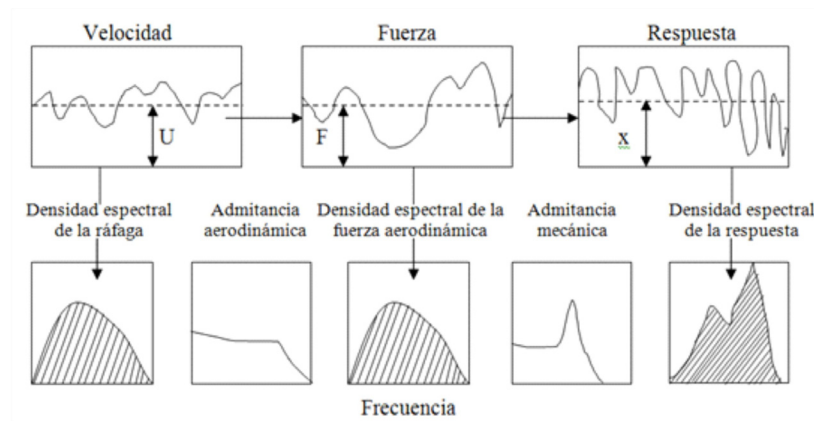
Siendo:  $G$  es el factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar y  $V_D$  la velocidad del viento.

No obstante, la carga estática equivalente puede no lograr estar en el rango de seguridad

para todos los casos, por lo cual los reglamentos de diseño para casos especiales o estructuras específicas solicitan determinar los efectos dinámicos. Evaluar la carga dinámica es un proceso complejo, por lo que en la práctica se ha permitido determinar la carga estática efectiva que consta de tres componentes: promedio, de fondo y resonante, mediante un método simplificado, una de las ecuaciones más empleadas para determinar la carga estática efectiva es la mostrada en (3).

$$\bar{P}_{(z,t)} = (0.50 \rho \bar{U}_h^2) \bar{C}_p(z) \quad (3)$$

Siendo  $0.50 \rho$  la densidad del aire,  $U_h$  la velocidad característica en m/seg, los valores de  $C_p(z)$  corresponden al coeficiente de presión promedio. Reglamentos como el australiano y neozelandés (AS-NZS, 2002) señalan que el factor  $C_p$  está entre 1.40 y 1.60, los cuales se emplean porque fueron obtenidos experimentalmente, mediante un importante número de experimentos en túnel de viento.



**Figura 8.** Esquema desarrollado a partir del método para evaluar el efecto dinámico del viento en estructuras elaborado por Davenport (1963), citado por Holmes (2001).

Los componentes de los efectos dinámicos tienen ecuaciones específicas, que se muestran a continuación: De fondo (4) y Resonante (5). El efecto dinámico está expresado de acuerdo con los parámetros de la ecuación (6).

$$p(z)_r = \bar{p}(z) + g_B \rho(z) \sigma_p(z) \quad (4)$$

Siendo  $p(z)$  la media de presiones del espectro de señal de velocidad característica en función de la altura,  $\sigma_p$  la desviación estándar del espectro de señal de velocidad característica.

$$f_R(z) = g_R m(z) (2\pi n_1)^2 \sqrt{a^2} \phi_1(z) \quad (5)$$

Siendo  $g_R$  el factor de pico de la respuesta resonante (2.5 a 5.0),  $m(z)$  masa por unidad de longitud,  $n_1$  frecuencia natural del primer modo,  $\sqrt{a^2}$  es el valor cuadrático medio (RSM por sus siglas en inglés) de la respuesta modal y  $\phi_1(z)$  es la forma del primer modo de vibración de la estructura excitada por la velocidad de viento.

$$f_s(z) = \bar{f}(z) + \frac{g_B \sigma_{f_B}}{\sqrt{g_B^2 \sigma_{f_B}^2 + g_R^2 \sigma_{f_R}^2}} f_B(z) + \frac{g_R \sigma_{f_R}}{\sqrt{g_B^2 \sigma_{f_B}^2 + g_R^2 \sigma_{f_R}^2}} f_R(z) \quad (6)$$

Siendo  $f(z)$  la componente promedio,  $f_B(z)$  la componente dinámica de fondo,  $f_R(z)$  la componente dinámica resonante y  $f_C(z)$  carga estática equivalente.

Alternativamente se puede usar la siguiente aproximación desarrollada por Holmes (2001), misma que es una buena simplificación (7), pero conservadora, ya que suma los efectos de la componente de fondo  $f_B$  y la resonante  $f_R$ , no importando el signo de éstas, ya que considera sólo los valores absolutos al momento de colocar el exponente cuadrático.

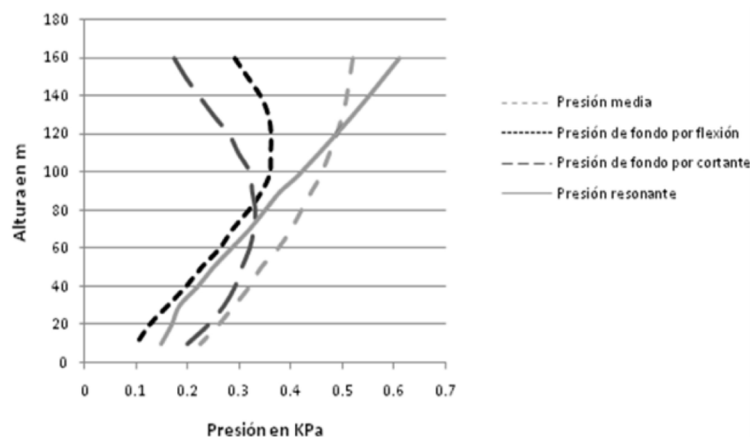
Para estructuras muy flexibles, pero muy sensibles a los efectos del viento, su propio movimiento generado por ligeras ráfagas de viento puede generar fuerzas aerodinámicas. En casos extremos, las fuerzas pueden generar la resonancia en la estructura, que amplifican las deformaciones y el daño asociado al desplazamiento. En la Figura 9 se muestra el efecto de la resonancia, las fuerzas de fondo y valores medios, para una estructura tubular de acuerdo con un estudio de Holmes (1996), el cual es citado en Holmes (2001).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Diseño del espectacular

Los valores estadísticos obtenidos del proceso de las señales de velocidades tanto para las medias como para las desviaciones estándar, representan el valor cuadrático medio (RSM por sus siglas en inglés) de la fluctuación, los cuales se muestran en el Cuadro 1.

Para el cálculo de las presiones por viento se emplea la ecuación (3), aunque se verifica con los reglamentos RCDF-NTC-DV-2004 con su ecuación (1), MOC-CFE-DV-1993 con su ecuación (2) y con las nuevas disposiciones del MOC-CFE-DV-2008. Los valores mayores de presión por viento se obtuvieron a partir de la ecuación (1), sin embargo corresponden a condiciones de una ciudad específica (el Distrito Federal); la fuerza intermedia se obtiene con la ecuación (3) que empleó coeficientes del reglamento de Aus-



**Figura 9.** El efecto de las tres fuerzas dinámicas en una estructura tubular de 160 m de altura, de acuerdo con el estudio de Holmes (1996), quien es citado por Holmes (2001).



**Cuadro 1.** Valores estadísticos para las tres señales de velocidades empleadas, correspondientes a valores críticos de dos reglamentos nacionales

Número de señal y reglamento de origen	Promedio (Km/h)	Promedio (M/seg)	Desviación estándar (Km/h)	Desviación estándar (M/seg)
U3-MOC-CFE-DV-93*	106.00	28.15	33.75	9.54
U2-MOC-CFE-DV-93*	90.00	25.00	28.42	7.89
U1-MOC-RCTGZ-04	80.00	22.22	31.47	8.74

\*Los valores son similares para el MOC-CFE-DV-2008.

tralia y Nueva Zelanda (2002), siendo este uno de los reglamentos más avanzados del mundo para el diseño por viento.

Posteriormente se determinan las áreas de las distintas placas que se emplean en la construcción del anuncio, de manera simplificada determinamos un módulo de sección requerido para las columnas por medio del momento basal considerando un factor de seguridad de 1.30. Estos cálculos se pueden observar en el Cuadro 2.

Con la ecuación de la escuadría y considerando las propiedades del acero A36 ( $F_y=2,530$  Kg/cm<sup>2</sup>), determinamos un módulo de sección  $S=2,183$ cm<sup>3</sup>, este valor sirve para el prediseño del espectacular, pero debemos satisfacer adicionalmente los efectos dinámicos que pueden producirse, entre ellos el efecto resonante. Debido a lo anterior se toma un modelo de sección 45% más grande y que corresponde al perfil S24x106, extraído del manual del AISC (1994), sus propiedades se presentan en el Cuadro 3.

Para calcular el espesor de las placas que sirven como base para el espectacular, se considera que éstas se apoyan simplemente en las columnas, de allí se toma el momento máximo de diseño, se despeja el espesor ( $t$ ) de la ecuación de la escuadría y se emplean las propie-

dades del acero A36, obteniéndose un espesor que, para nuestro caso, fue de  $t=2.54$  cm o una pulgada (espesor que considera el pandeo, esfuerzos residuales, etcétera).

### Determinación de la deflexión máxima considerando solamente las fuerzas estáticas equivalentes de fondo

Para determinar los coeficientes de influencia para el desplazamiento empleamos la ecuación (8) para carga unitaria:

$$\Delta_{\max} = \frac{1}{K} = \frac{L^3}{3EI} \quad (8)$$

Siendo  $L$  la longitud en cm,  $E$  el módulo de elasticidad en kg/cm<sup>2</sup> e  $I$  el módulo de inercia en cm<sup>4</sup>.

Con los coeficientes de influencia aplicados en la ecuación (8), se obtienen las deflexiones mostradas en la Figura 10, las cuales están en función de  $P$ .

Para realizar los cálculos estadísticos y las combinaciones de las señales se desarrolló una hoja de cálculo en un programa comercial. A continuación se presentan en el Cuadro 4, tan

**Cuadro 2.** Cálculo del momento basal que actúa en el modelo de espectacular seleccionado

Presión máxima de todos los reglamentos (Kg/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Fuerza (Kg)	Altura (m)	Momento basal (Kg*m)
634.52	8.0	5,148.14	11.00	59,599.54
566.25	4.0	2,265.05	7.50	16,987.88
465.09	4.0	1,860.36	4.50	8,371.62
Momento basal de diseño				84,959.04

**Cuadro 3.** Propiedades de los perfiles estructurales empleados como columnas

Designación	Área (in <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup> )	Profundidad (in/cm)	Espesor del alma (in/cm)	Ancho del patín (in/cm)	Espesor del patín (in/cm)	Módulo de sección en x (in <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Momento de inercia en x (in <sup>4</sup> /cm <sup>4</sup> )
S24x106	31.2	24.5	0.62	7.87	1.09	240	2,940
S60x106	201.29	62.23	1.57	19.99	2.77	3,932.90	122,372.04

Siendo in la abreviación de pulgadas en inglés (inches).

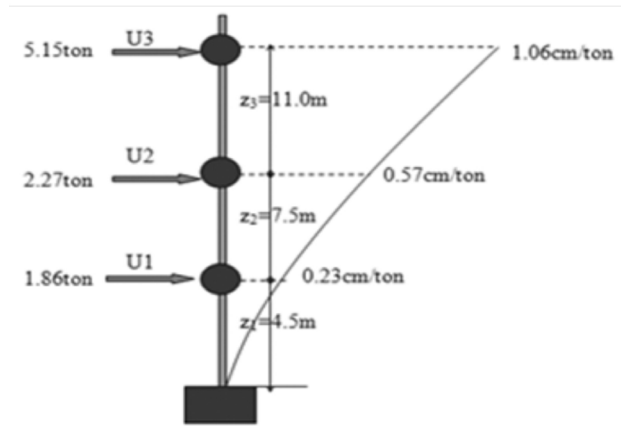


Figura 10. Esquema deformado del modelo de espectacular en función de la carga estática P.

sólo las primeras 20 filas de corridas de un proceso de 1,020.

Tras analizar el proceso de cálculo de el Cuadro 4, los datos que resultan de cada columna se sustituyen en la ecuación (9), la que considera valores de presión "p" y de índices de influencia "i"

$$\sigma_r = \sqrt{p_1^2 I_1^2 + p_2^2 I_2^2 + p_3^2 I_3^2 + 2p_1 p_2 I_1 I_2 + 2p_1 p_3 I_1 I_3 + 2p_2 p_3 I_2 I_3} \quad (9)$$

$\sigma_r = 1.48 \frac{kgf}{m^2} * m$ . Los metros lineales en las unidades se cancelan con las unidades de la línea de influencia.

Las fuerzas estáticas equivalentes de fondo se calcularon con la ecuación (10) que nos muestra otra manera de expresar la componente dinámica de fondo, los resultados se presentan en el Cuadro 5. Con la ecuación (4) se determinó la presión de fondo estática, donde el valor de gB se consideró conservadoramente de 4, ya que el reglamento de Australia y Nueva Zelanda (AS-NZS, 2002), sugiere 3.70 y el de Estados Unidos (ASCE/SEI 7, 2005) es de 3.40.

$$\rho(z)_r^* = \rho_{r,m} = \sum_k \frac{\bar{p}(z,t) \bar{p}(z_k,t) I_k}{\sigma_m \sigma_r} \quad (10)$$

### Determinación de la deflexión máxima considerando las tres componentes dinámicas

Primeramente se concentraron las masas del prototipo de espectacular seleccionado, para

Cuadro 4. Cálculos estadísticos y combinaciones de las presiones para las diversas señales

rms	8.74	7.89	9.21	130.16	103.24	123.55	57419.66	38367.59	56507.22	13,648.06	15,368.92	17,179.05
Medias	0.00	0.00	0.00	5.97	4.13	3.34	16960.51	10665.77	15259.63	-1,069.77	1,236.52	-2,391.82
t (seg)	U1' (m/seg)	U2' (m/seg)	U3' (m/seg)	P1' (kg/m²)	P2' (kg/m²)	P3' (kg/m²)	P1'² (kg/m²)	P2'² (kg/m²)	P3'² (kg/m²)	P1P2	P1P3	P2P3
0.025	-9.52	6.44	-7.92	-85.42	37.55	-52.29	7,296.42	1,410.09	2,733.97	-3,207.59	4,466.34	-1,963.45
0.050	-11.03	7.18	-4.03	-114.53	46.73	-13.53	13,118.21	2,183.28	183.08	-5,351.70	1,549.73	-632.23
0.075	-10.43	4.21	-0.22	-102.49	16.06	-0.04	10,503.93	258.00	0.00	-1,646.23	4.24	-0.66
0.100	-9.92	3.28	-11.84	-92.75	9.72	-116.86	8,602.56	94.48	13,657.41	-901.53	10,839.22	-1,135.93
0.125	-9.38	4.71	-4.07	-82.96	20.09	-13.81	6,881.75	403.80	190.60	-1,666.99	1,145.29	-277.43
0.150	-7.68	8.26	-3.62	-55.49	61.79	-10.96	3,079.17	3,818.29	120.01	-3,428.87	607.90	-676.94
0.175	-5.66	3.87	1.39	-30.22	13.54	1.62	913.34	183.30	2.61	-409.16	-48.84	21.88
0.200	-3.69	4.05	5.87	-12.79	14.89	28.77	163.67	221.75	827.43	-190.51	-368.00	428.35
0.225	-0.65	2.52	8.54	-0.40	5.77	60.85	0.16	33.27	3,702.86	-2.32	-24.44	350.98
0.250	1.01	-4.05	10.76	0.95	-14.83	96.55	0.91	219.85	9,321.75	-14.11	91.91	-1,431.57
0.275	3.23	2.33	11.67	9.83	4.91	113.55	96.59	24.12	12,893.11	48.26	1,115.93	557.64
0.300	2.99	3.60	5.80	8.41	11.74	28.04	70.74	137.94	786.24	98.78	235.83	329.32
0.325	3.05	-3.40	10.23	8.78	-10.49	87.22	77.11	110.06	7,606.78	-92.12	765.88	-914.98
0.350	2.74	-0.61	6.88	7.05	-0.34	39.45	49.66	0.12	1,556.17	-2.39	278.00	-13.39
0.375	1.61	-9.26	9.82	2.45	-77.64	80.49	5.99	6,028.42	6,478.38	-190.02	196.98	-6,249.35
0.400	-0.01	-2.00	-5.25	0.00	-3.61	-22.99	0.00	13.01	528.64	0.00	0.00	82.94
0.425	-1.44	-11.05	-0.97	-1.96	-110.61	-0.78	3.85	12,233.56	0.61	217.08	1.53	86.19
0.450	-2.85	-8.66	-16.01	-7.66	-67.95	-213.71	58.64	4,617.58	45,672.81	520.35	1,636.50	14,522.32
0.475	-4.28	-6.79	-10.88	-17.28	-41.72	-98.72	298.60	1,740.76	9,746.11	720.97	1,705.93	4,118.94
0.500	-5.85	-5.47	-1.98	-32.25	-27.15	-3.29	1,039.93	737.31	10.79	875.64	105.94	89.20

**Cuadro 5.** Fuerzas estáticas equivalentes de fondo obtenidas con las ecuaciones (10) y (4), respectivamente, y las deformaciones máximas sin considerar la resonancia

Número de señal y reglamento de origen	$P_n$ (Kg/m2/m/seg)	F'n (Ton)	$\delta_{Rmax}$ (cm)
U3-MOC-CFE-DV-93*	0.972	3.84	11.26
U2-MOC-CFE-DV-93*	0.578	0.95	4.25
U1-MOC-RCTGZ-04	0.452	0.94	4.07

\*Los valores son similares para el MOC-CFE-DV-2008.

obtener un modelo dinámico que considera las masas discretas en una barra vertical. Se considera, en forma aproximada, que la masa de las barras se concentra en los tres grados de libertad.

$$m_1 = (8 \times 10^{-6} \text{kg/cm}^3) \times (200 \text{cm} \times 200 \text{cm} \times 2.54 \text{cm} + (175 \text{cm} + 100 \text{cm}) \times 201 \text{cm}^2) = 1.26 \text{kg}$$

$$m_2 = (8 \times 10^{-6} \text{kg/cm}^3) \times (200 \text{cm} \times 100 \text{cm} \times 2.54 \text{cm} + (175 \text{cm} + 150 \text{cm}) \times 201 \text{cm}^2) = 0.93 \text{kg}$$

$$m_3 = (8 \times 10^{-6} \text{kg/cm}^3) \times (200 \text{cm} \times 100 \text{cm} \times 2.54 \text{cm} + (225 \text{cm} + 150 \text{cm}) \times 201 \text{cm}^2) = 1.01 \text{kg}$$

Se obtuvieron los modos de vibración del modelo de espectacular en el programa SAP2000 versión 10, cuya deformada se observa en la Figura 11 y los factores de participación modal y períodos de vibración, se presentan a continuación.

Modo 1 (T=0.340 s)

$$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 2.50 \\ 1.38 \\ 0.57 \end{Bmatrix},$$

Modo 2 (T=0.051 s)

$$\phi_2 = \begin{Bmatrix} 1.19 \\ -1.97 \\ -2.14 \end{Bmatrix},$$

Modo 3 (T=0.017 s)

$$\phi_3 = \begin{Bmatrix} -0.50 \\ 2.23 \\ -2.24 \end{Bmatrix}$$

Considerando las formas de participación modal y las matrices de masas y frecuencias para los tres períodos y señales de velocidad,



**Figura 11.** Formas modales de los tres primeros modos de vibración del espectacular, siendo dos traslacionales (en ejes x y) y un rotacional (en eje z). Modelo en SAP2000.

empleando las ecuaciones usadas para el análisis modal espectral para diseño por sismo, obtenemos las ecuaciones que se presentan a continuación, para los valores de las tres señales de velocidad. Debemos enfatizar que se deben mantener los signos de cada elemento para identificar las presiones (positivas) y las succiones (negativas).

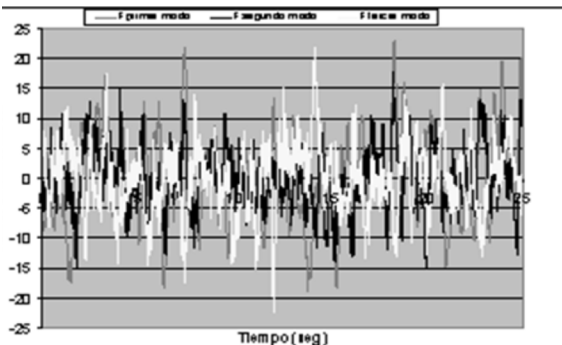
$$\left[ \begin{matrix} (\phi)^T (F) \\ (\phi)^T (M) (\phi) \end{matrix} \right]_{\text{1er modo}} = \frac{\begin{Bmatrix} 2.50 \\ 1.38 \\ 0.57 \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} 8*0.5*1.2*U_3^2*1.39 \\ 8*0.5*1.2*U_2^2*1.51 \\ 8*0.5*1.2*U_1^2*1.57 \end{Bmatrix}}{\begin{Bmatrix} 2.50 \\ 1.38 \\ 0.57 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} 2.52 & 0 & 0 \\ 0 & 1.86 & 0 \\ 0 & 0 & 2.02 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 2.50 \\ 1.38 \\ 0.57 \end{Bmatrix}} = (0.840)U_3^2 + (0.251)U_2^2 + (0.108)U_1^2$$

$$\left[ \begin{matrix} (\phi)^T (F) \\ (\phi)^T (M) (\phi) \end{matrix} \right]_{\text{2do modo}} = \frac{\begin{Bmatrix} 1.19 \\ -1.97 \\ -2.14 \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} 8*0.5*1.2*U_3^2*1.39 \\ 8*0.5*1.2*U_2^2*1.51 \\ 8*0.5*1.2*U_1^2*1.57 \end{Bmatrix}}{\begin{Bmatrix} 1.19 \\ -1.97 \\ -2.14 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} 2.52 & 0 & 0 \\ 0 & 1.86 & 0 \\ 0 & 0 & 2.02 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1.19 \\ -1.97 \\ -2.14 \end{Bmatrix}} = (0.396)U_3^2 + (-0.357)U_2^2 + (-0.403)U_1^2$$

$$\left[ \begin{matrix} (\phi)^T (F) \\ (\phi)^T (M) (\phi) \end{matrix} \right]_{\text{3er modo}} = \frac{\begin{Bmatrix} -0.50 \\ 2.23 \\ -2.24 \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} 8*0.5*1.2*U_3^2*1.39 \\ 8*0.5*1.2*U_2^2*1.51 \\ 8*0.5*1.2*U_1^2*1.57 \end{Bmatrix}}{\begin{Bmatrix} -0.50 \\ 2.23 \\ -2.24 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} 2.52 & 0 & 0 \\ 0 & 1.86 & 0 \\ 0 & 0 & 2.02 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -0.50 \\ 2.23 \\ -2.24 \end{Bmatrix}} = (-0.167)U_3^2 + (0.404)U_2^2 + (-0.422)U_1^2$$

Las fuerzas dinámicas modales para las tres señales se grafican en la Figura 12, donde observamos que el primer (un traslacional) y tercer modo (modo rotacional) de vibración generan amplitudes mayores.

De cada modo se obtiene la amplitud de la componente de resonancia de la fuerza dinámi-



**Figura 12.** Fuerzas dinámicas modales para las tres señales de velocidad aplicadas en el espectacular.

ca. Suponiendo que el amortiguamiento es muy pequeño, sólo hay que calcular las amplitudes de una transformada rápida de Fourier (TRF). La relación entre la amplitud "a" de la componente de la amplitud "A" de la TRF se obtiene con la ecuación (12).

$$a = 2 \sqrt{\frac{\text{AmplituddeFourier}}{\text{Númerodepuntos}}} \quad (12)$$

A continuación se presentan las gráficas que contienen las TRF para las señales estudiadas, tanto en escala logarítmica (véase Figura 13a), aritmética (véase Figura 13b) y una mixta para facilitar el análisis (véase Figura 13c).

Posteriormente se determinan los valores máximos de las aceleraciones debidas a las componentes dinámicas para los tres modos para A (m/seg<sup>2</sup>) y af (m/seg<sup>2</sup>) en las inmediaciones de T (número de datos obtenidos n=2,020), los resultados se colocan en el Cuadro 6.

La respuesta de la aceleración se obtiene con la ecuación (13).

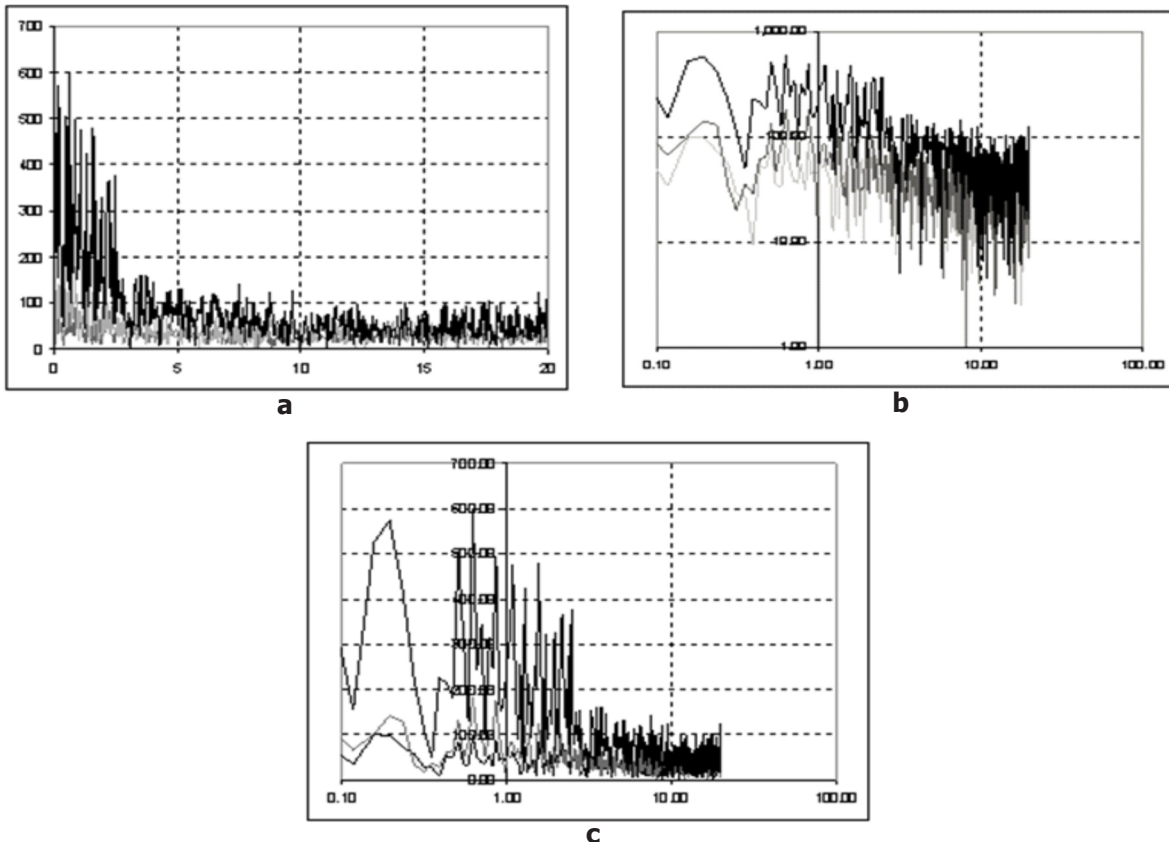
$$a_{\text{respuesta}} = \frac{T^2}{8\rho^2x} \left( \frac{F}{m} \right) \quad (13)$$

Siendo el amortiguamiento del sistema  $\xi=0.005$ , T es el período en segundos, F es la frecuencia en 1/s. y m es la masa del sistema en Kg. Los valores resultantes se colocan en el Cuadro 7.

El desplazamiento máximo para cada modo se obtiene con la ecuación (14) y se muestra en el Cuadro 7.

$$\delta_{\text{max}} = \begin{Bmatrix} I_3 \\ I_2 \\ I_1 \end{Bmatrix}^T \alpha_{\text{resp}} \{ \phi \}^T [K] \quad (14)$$

De acuerdo con los resultados del análisis el máximo desplazamiento por la componente resonante es de  $\delta_{\text{max}} = 4.40$  cm, pero si sumamos adicionalmente los 11.26 cm de las deformaciones debidas a las componentes promedio y de fondo, la deformación alcanzaría los 15.66 cm.



**Figura 13.** a. Amplitudes de una transformada rápida de Fourier (TRF) en escala aritmética. b. Amplitudes de una transformada rápida de Fourier (TRF) en escala logarítmica, y c. Amplitudes de una transformada rápida de Fourier (TRF) en escala mixta.

**Cuadro 6.** Determinación de la aceleración máxima para los dos primeros modos

T (s.)	A (m/s <sup>2</sup> ) 1er modo	A (m/s <sup>2</sup> ) 2do modo	A (m/s <sup>2</sup> ) 3er modo	af (m/s <sup>2</sup> ) 1er modo	af (m/s <sup>2</sup> ) 2do modo	af (m/s <sup>2</sup> ) 3er modo
0.340	80	50	8	0.40	0.31	0.13
0.051	124	66	14	0.49	0.36	0.17

T (s.)	aresp (m) 1er modo	aresp (m) 2do modo	aresp (m) 3er modo	$\delta_{\max TnNn}$ 1er modo	$\delta_{\max TnNn}$ 2do modo	$\delta_{\max TnNn}$ 3er modo
0.340	0.117	0.091	0.038	3.36	2.61	1.09
0.051	0.003	0.002	0.001	0.04	0.03	0.02

Deformación que para ciertos casos puede ser determinante en la estabilidad de la estructura.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se presentó una metodología para revisar las deformaciones que se producen en estructuras flexibles (mamparas de espectaculares) por los efectos dinámicos de señales de ráfaga de viento. La metodología se basa en conceptos de dinámica de fluidos y de diseño sísmico dinámico del tipo modal espectral, muy similar al empleado en ingeniería sísmica y dinámica estructural. Para emplear la metodología se requiere considerar una señal dinámica cuyas frecuencias alcancen las velocidades del período de retorno medio de las ráfagas, según el tipo de estructura, uso e importancia. Esta metodología puede emplearse en estructuras que tengan un comportamiento dinámico similar a un péndulo invertido (tanques elevados y anuncios espectaculares).

Las velocidades de viento sugeridas por el MOC-CFE-DV-93, para períodos de retorno de 50 años (106 km/h) para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, la nueva versión del MOC-CFE-DV-2008 mantiene velocidades similares, conducen a diseños más seguros y conservadores, por lo que se recomienda sean empleados para el diseño de espectaculares, torres de transmisión y otras estructuras esbeltas como es el caso de viveros, tanques elevados y estructuras que tengan un área expuesta importante a cierta altura y soportados por estructuras esbeltas poco redundantes, debido a que estas estructuras son muy sensibles al efecto de ráfaga, que las pueden conducir a estados de resonancia.

Las componentes de resonancia de las fuerzas de viento pueden inducir deformaciones adi-

cionales a la estructura 30% de las generadas por los factores dinámicos de fondo y estático promedio, por lo que esto debe considerarse en el diseño de cualquier estructura, empleando cartabones, atiesadores y/o tirantes que disminuyan la flexibilidad original, que incrementen la ductilidad, así como perfiles estructurales con un mejor comportamiento aerodinámico, tales como los perfiles tubulares.

Durante el desarrollo del artículo se observó que los daños que se han presentado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en estructuras empleadas para espectaculares no son aleatorios, sino que obedecen a un conjunto de patologías de análisis y diseño, cuyos efectos en el riesgo de estas estructuras, son incrementados porque no se solicitaba un estudio estructural adecuado antes de dar el permiso por parte del municipio, así como tampoco se supervisaba el cuidado y mantenimiento que se les daba.

Tras analizar los resultados de la metodología implementada, se sugiere considerar los reglamentos de Australia y Nueva Zelanda-2002 y las nuevas MOC-CFE-DV-2008, como base para desarrollar los estudios e investigaciones pertinentes a fin de obtener unas Normas Técnicas Complementarias para diseño por viento para Tuxtla Gutiérrez y otros municipios del estado Chiapas, principalmente en las regiones donde se presentan vientos huracanados con cierta frecuencia.

## REFERENCIAS

- AISC. (1994). Manual of Steel Construction. Load and Resistance Factor Design. Volume I. Structural Members Specifications, and Codes. Volume II. Connections. Second edition, United States, 1,993 pp.
- Ambrose J. y Vergun, D. (2003). Diseño simplificado de edificios para cargas de viento y sismo. Limusa, Segunda edición, México, D.F., 326 pp.

- AS-NZS. (2002). Australian/New Zealand Standard-Structural design actions AS/NZS 1170.2:2002 Part 2: Wind actions. Australia, Code 105 pp and Commentary 60 pp.
- ASCE/SEI 7. (2005). Minimum design loads for buildings and other structures, section 7 Wind design, United States.
- Baeza, J.C., Vargas, G. y Pérez, D. (2004). La peligrosidad de las mamparas elevadas (anuncios espectaculares) ante viento huracanado. *Ingeniería Revista Académica*, Universidad Autónoma de Yucatán, sep-dic, Vol. 8, Núm. 3, pp. 47-57.
- CFE. (2008). Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad, Diseño por Viento. (MOC-CFE-DV-2008), Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos; México. Diciembre de 2008.
- CFE. (1993). Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad, Diseño por Viento. (MOC-CFE-DV-1993), México, D.F., 272 pp.
- GDF. (2004). Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Viento del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, Diario Oficial, (RCDF-NTC-DV-2004), México, D.F., 15 pp.
- Holmes, J. (2001). Wind loading of structures. Spon Press, Taylor and Francis Group, Toronto, Canada, 357 pp.
- López, A.; Sánchez, J.; Muñoz, C.; Pérez, L. y Cordero, C. (2008). Criterios óptimos para el diseño por viento para México. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, Veracruz; México. Publicado en CD.
- López, O. y Toledo, H. (2003). Estudio de la seguridad de edificaciones de vivienda ante incidencia de viento. Informe técnico CENAPRED, agosto de 2003, México, D.F., 78 pp.
- RCTGZ. (2004). Reglamento de Construcciones del Municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 102 pp. [http://www.cicch.org.mx/templates/doctos/reglamento\\_construcciontgz.pdf](http://www.cicch.org.mx/templates/doctos/reglamento_construcciontgz.pdf). Descarga en línea el 16 de marzo de 2009.
- Rosengaus, M. (1998). Efectos destructivos de ciclones tropicales. Editorial MAPFRE, Madrid, España, 251 pp.
- SAP2000. (2007). Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computer and Strucres Inc and Berkeley University. United States of America.
- Sordo, E. (2006). Apuntes de la materia de Ingeniería eólica. Posgrado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, México, D.F.

<sup>i</sup> [http://noticias.cuarto-poder.com.mx/4p\\_apps/periodico/pag.php?MjQyNjM%3D](http://noticias.cuarto-poder.com.mx/4p_apps/periodico/pag.php?MjQyNjM%3D) consultada el 16 de marzo de 2009.

<sup>ii</sup> [http://noticias.cuarto-poder.com.mx/4p\\_apps/periodico/pag.php?NTE0ODQ%3D](http://noticias.cuarto-poder.com.mx/4p_apps/periodico/pag.php?NTE0ODQ%3D) consultada el 16 de marzo de 2009

<sup>iii</sup> [http://noticias.cuarto-poder.com.mx/4p\\_apps/periodico/pag.php?MTYxODE%3D](http://noticias.cuarto-poder.com.mx/4p_apps/periodico/pag.php?MTYxODE%3D) consultada el 16 de marzo de 2009.

<sup>iv</sup> [http://noticias.cuarto-poder.com.mx/4p\\_apps/periodico/pag.php?MjAzNDA%3D](http://noticias.cuarto-poder.com.mx/4p_apps/periodico/pag.php?MjAzNDA%3D) consultada el 16 de marzo de 2009.

<sup>v</sup> [http://noticias.cuarto-poder.com.mx/4p\\_apps/periodico/pag.php?NTU5MjQ%3D](http://noticias.cuarto-poder.com.mx/4p_apps/periodico/pag.php?NTU5MjQ%3D) consultada el 16 de marzo de 2009.