

COMPARACIÓN DE ACELERACIONES EN CONDICIONES DE SERVICIO ANTE CARGAS EÓLICAS Y SÍSMICAS EN EDIFICIOS ALTOS EN MÉXICO

Hernández Barrios H.^a y López López A.^b

^aFacultad de Ingeniería Civil, Edificio de Posgrado, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, CU, Morelia, Michoacán, México, hnb.umich@yahoo.com.mx, <http://www.fic.umich.mx/fic>

^bInstituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Ingeniería Civil, Calle Reforma No. 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62490, Teléfono: (777) 362-38-11, extensión: 7582, alopezl@iie.org.mx

Palabras Clave: Aceleraciones de piso, condiciones de servicio, estados límite, edificios altos.

Resumen. La ciudad de México, DF, está localizada en una zona potencialmente sísmica y en donde existen un gran número de edificios altos que han sido diseñados considerando recomendaciones sísmicas ante cargas de servicio y de colapso, en general las cargas eólicas son ignoradas. La Norma Técnica complementaria de Diseño al reglamento de Construcciones del Distrito Federal considera como desplazamiento máximo lateral por cargas eólicas la altura del edificio entre 300, pero no considera absolutamente ninguna recomendación para aceleraciones debidas a cargas eólicas.

En este trabajo se calculan las aceleraciones en edificios altos en la dirección longitudinal y transversal al flujo del viento considerando las velocidades registradas en el DF con un periodo de retorno de 10 años, considerada como velocidad de servicio. En el RCDF (2004) actualmente no existen lineamiento para considerar las aceleración de servicio por confort en edificios altos, sin embargo, sí se considera como límite de confort una aceleración de 0.03g la mayoría de los edificios construido en el DF no satisfacen este requisito.

En el edificio del ejemplo de aplicación, utilizado en este trabajo, se calculan las aceleraciones debidas a efectos eólicos y las aceleraciones obtenidas símicamente bajo el sismo de servicio. Al comparar dichas aceleraciones se encuentra que las aceleraciones eólicas en la dirección transversal al flujo del viento son del mismo orden de magnitud que las sísmicas. Si se considera como límite de condición de servicio una aceleración de 0.03g, tanto para cargas eólicas como sísmicas, el edificio del ejemplo de aplicación no satisface este requisito.

1 INTRODUCCIÓN

En el Distrito Federal (DF), capital de la República Mexicana, recientemente se han estado construyendo edificios con altura de hasta 250m. El reglamento de diseño del DF (RCDF, 2004) es la base de los lineamientos de los reglamentos locales de los estados o provincias. De esta manera sí el RCDF (2004) considera que el desplazamiento máximo lateral para que se satisfaga la condición de servicio ante cargas eólicas, es la altura de entrepiso entre 300, todos los reglamentos de los estados consideran al menos esta misma recomendación. Lamentablemente el RCDF (2004) en su apartado de diseño por viento no considera ninguna recomendación para el caso de aceleraciones producidas por el viento para ningún tipo de estructura. Debido a que el Distrito Federal, por su estratigrafía geotécnica y su importancia socio-política, dedica gran parte de su normatividad de diseño a la parte sísmica, la mayoría de las edificaciones son principalmente diseñadas sísmicamente y generalmente se ignoran las recomendaciones eólicas de diseño, principalmente para estructuras tipo edificios.

La posible razón de lo anterior se debe a que las condiciones de servicio por aceleraciones producidas por el viento, no genera inestabilidad o daño estructural, sino que son cuantificables de manera subjetiva por cada individuo que habita el edificio, sin embargo, estudios experimentales en otros países como Japón y Canadá, indican la importancia de considerar dicho estado de servicio en el diseño de edificios.

El hecho que no existan lineamientos referentes al estado límite de servicio por aceleraciones, es más crítico para edificios construidos en algunas ciudades que se encuentran ubicadas en zonas turísticas de playa, principalmente en las costas del Océano Pacífico y del Golfo de México, estas zonas son altamente sísmicas pero también son zonas de fuertes vientos huracanados ([Figura 1](#)).



Figura 1: Zonas potencialmente eólicas y sísmicas en México.

2 ACELERACIONES DEBIDAS A CARGAS EÓLICAS, EN EL DF

Para fines de diseño eólico en la República Mexicana ([Figura 2](#)), se distinguen dos zonas geográficas: 1) la zona de fuertes vientos ubicada en la costa del Océano Pacífico y del Golfo de México y 2) la zona del Distrito Federal.

Las velocidades de diseño para la zona de fuertes vientos y las recomendaciones generales de diseño se encuentran en el Manual de Diseño de Obras Civiles ([MDOC, 2008](#)) y las velocidades y recomendaciones de diseño para el caso del Distrito Federal, por tratarse de la capital del país, se encuentran en la Norma Técnica Complementaria al reglamento de diseño del Distrito Federal ([RCDF, 2004](#)). En este trabajo se hará referencia únicamente a las aceleraciones eólicas debidas a velocidades en la zona del Distrito Federal.

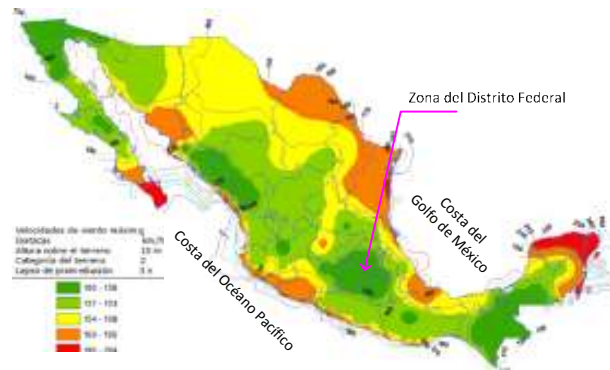


Figura 2: Mapa de iguales velocidades de viento en México, zona del DF y zona de fuertes vientos (MDOC, 2008).

En el Distrito Federal rige como órgano de diseño el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias (RDCF, 2004). En dicho reglamento las condiciones de servicio para cargas eólicas que se recomiendan están relacionadas con los desplazamientos máximos laterales, en lo referente a las aceleraciones no se contempla ningún lineamiento. La velocidad regional a 10 m de altura en terreno plano promediada a 3s se divide en dos zonas que agrupan las delegaciones políticas de la ciudad y están relacionadas a periodos de retorno de 200 años para estructuras importantes (grupo A), para periodos de retorno de 50 años para estructuras medianamente importantes (grupo B) y para estructuras provisionales a 10 años de periodo de retorno (Tabla 1).

Zona eólica	Importancia de la construcción (velocidad en m/s)		
	A/200 años	B/50 años	Temporal/10 años
Zona I	39	36	31
Zona II	35	32	28

Tabla 1: Velocidad regional (m/s) en el Distrito Federal.

Considerando que en la ciudad del DF, se pueden tener dos tipos de terreno: (a) terreno abierto con pocas obstrucciones y (b) terreno de centro de ciudad con grandes obstrucciones, y con el fin de aplicar los lineamientos de los códigos de diseño de Japón (AIJ, 2004), de Australia (AS/NZS, 2002) y de los Estados Unidos de Norteamérica (ASCE, 2005) en lo referente a aceleraciones longitudinales y transversales al flujo del viento en edificios, se propone la equivalencia entre tipos de terreno mostrados en la Tabla 2, y la equivalencia de las velocidades de la Tabla 3, según el tiempo de promediación de la velocidad que requiere cada código de diseño.

Terreno	Reglamento	Categoría del terreno
Abierto	AIJ, 2004	1
	AS/NZS, 2002	1
	ASCE, 2005	D
Centro de ciudad	AIJ, 2004	V
	AS/NZS, 2002	4
	ASCE, 2005	B

Tabla 2: Equivalencia del tipo de terreno utilizada.

Tiempo de promediación	Zona I		Zona II	
	Tr =200 años	Tr =10 años	Tr =200 años	Tr =10 años
3 segundos	39	31	35	28
10 minutos	24.84	19.74	22.3	17.83
1 hora	25.65	20.39	23.02	18.42

Tabla 3: Equivalencia de la velocidad (m/s) a diferentes tiempos de promediación.

El procedimiento de cálculo de las aceleraciones longitudinales y transversales al flujo del viento que actúan sobre estructuras prismáticas tipo edificios, no se repetirá en este trabajo por cuestiones de espacio, pero las expresiones y dicho procedimiento se describen a detalle en cada uno de los códigos utilizados (AIJ, 2004; AS/NZS, 2002; ASCE, 2005). Por su puesto, al no ser zona de huracanes el DF el modelo para el cálculo de las velocidades de diseño no contempla el efecto de vientos huracanados.

Para realizar el análisis paramétrico se considerarán las relaciones geométricas: altura-ancho-profundidad (H:B:D) para un edificio (Figura 3).

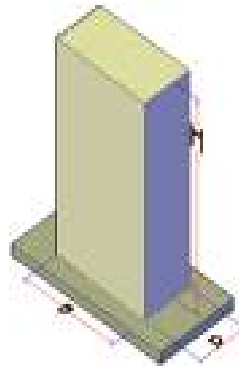


Figura 3: Relaciones geométrías de los edificios empleados en el análisis.

Se calcularán las aceleraciones longitudinales y transversales al flujo del viento, para edificios con diferentes relaciones geométricas referidas en la Figura 3 y diferentes periodos fundamentales calculados con la expresión,

$$T = \frac{n}{10} \quad (1)$$

donde $T(s)$ es el periodo fundamental del edificio y n es el número de entresijos del mismo.

Las aceleraciones calculadas para la zona I del DF (Tabla 1) en terreno abierto en la dirección longitudinal se muestran en la Figura 4 y para la dirección transversal al flujo del viento en la Figura 5.

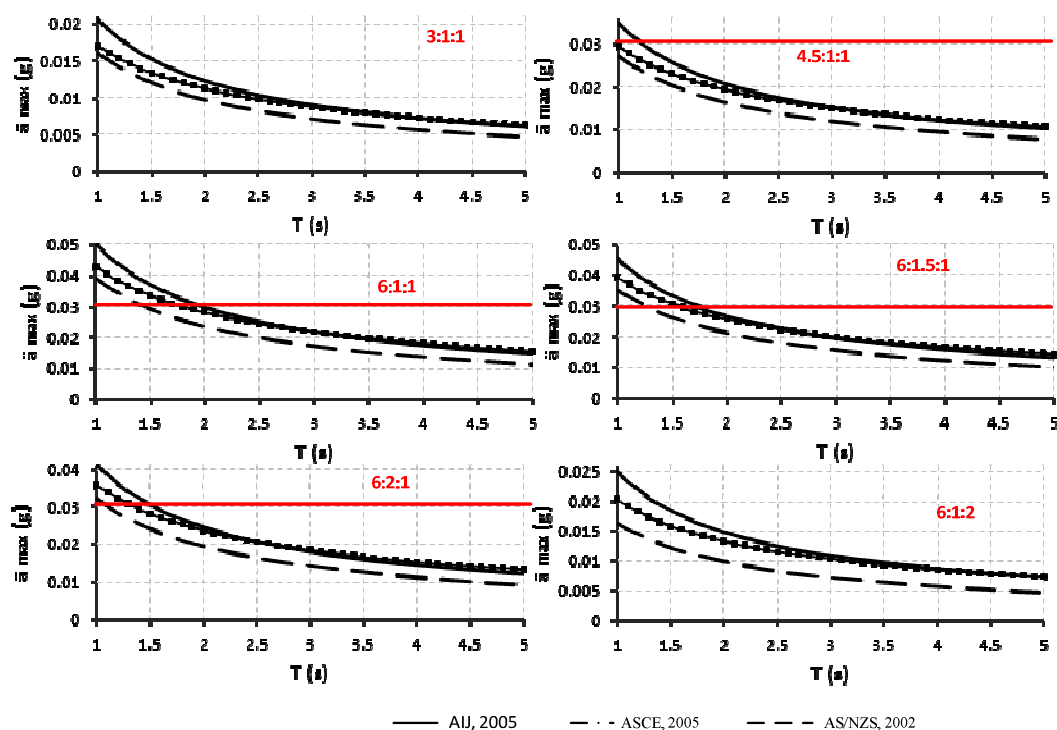


Figura 4: Aceleraciones en la dirección longitudinal al viento, zona I, terreno abierto.

En la [Figura 4](#) se observa que si se considera como límite de aceleraciones producidas por las cargas eólicas en la dirección longitudinal al flujo del viento de 0.03g, para que se satisfagan los requisitos de confort de los habitantes o usuarios del edificio, la mayoría de los edificios con las relaciones geométricas analizadas cumplen con este requisito, excepto para edificios con relación: 6:1:1; 6:1.5:1 y 6:2:1, con periodos fundamentales entre 1 y 1.5 segundos, en los cuales la aceleración es ligeramente mayor a este límite.

En la [Figura 5](#) se muestran las aceleraciones debidas a efectos eólicos en la dirección transversal para edificios con diferentes periodos de vibrar. Se observa que considerando como límite máximo una aceleración de 0.03g como límite de servicio por comodidad de los usuarios, la mayoría de los edificios no satisfacen este límite.

Las aceleraciones más críticas se obtienen para edificios con relación geométrica 6:1:1 llegando a ser de 0.17g para edificios con periodo de vibrar de un segundo. Los edificios con esta relación geométrica no satisfacen el requisito de 0.03g como aceleración máxima.

Para edificios con relaciones geométricas: 4.5:1:1 y 6:1.5:1 los edificios con un periodo de vibrar entre 1 y 3 tampoco satisfacen este estado límite de servicio.

Los resultados de las aceleraciones debidas a cargas eólicas en la zona I en terreno de ciudad son similares a los antes reportados, lo mismo se puede decir para la zona II para ambos tipos de terreno.

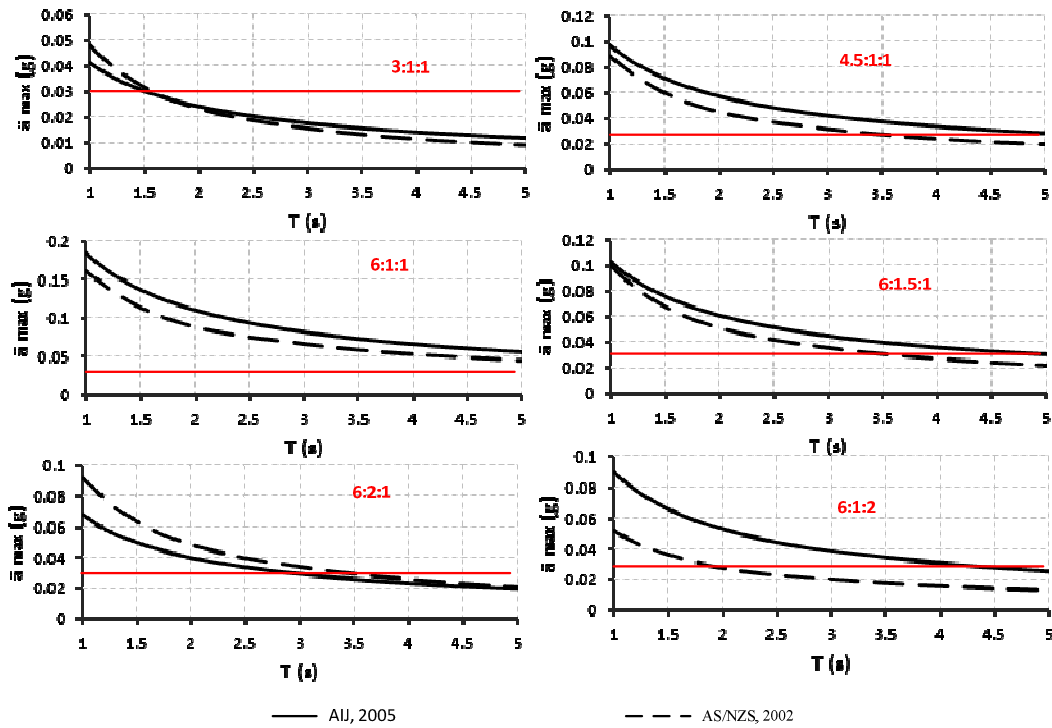


Figura 5: Aceleraciones en la dirección transversal al viento, zona I, terreno abierto.

2.1 Ejemplo de aplicación

En este apartado se aplicaran las expresiones propuestas en el reglamento de Canadá (NRCC, 1995) para el mismo edificio que se analizará para el cálculo de las aceleraciones debidas a cargas de servicio sísmicas. Las características son: altura del edificio $H = 183\text{m}$, ancho del edificio $B = 30.48\text{m}$ y profundidad $D = 30.48\text{m}$, considerando 50 niveles en periodo fundamental es $T_1 = 5\text{s}$, la densidad másica del edificio es $\rho = 192.03\text{kg/m}^3$ y el amortiguamiento asociado en ambas direcciones de análisis $\xi_1 = 0.01$. Se considera un coeficiente de fuerza de $C_d = 1.30$ y una densidad del aire de $\rho_a = 1.3\text{kg/m}^3$, para un terreno de exposición abierto con pocas obstrucciones.

Como resultado se obtiene que el factor de ráfaga es $C_g = 2.809$, la aceleración longitudinal máxima es $a_D = 0.0277g$ y la aceleración transversal máxima de $a_w = 0.0498g$, en donde g es la aceleración de la gravedad.

Como puede observarse si se considera como límite una aceleración de $0.03g$ para que se satisfaga el requisito de confort, el edificio de este ejemplo no satisface este requisito.

3 ACELERACIONES DEBIDAS A CARGAS SÍSMICAS, EN EL DF

El modelo utilizado para representar los edificios es un modelo de una viga de corte acoplada a una viga por flexión, este es el modelo numérico de un edificio compuesto por columnas, vigas y muros de corte, tal como actualmente es la estructuración de los edificios altos (Figura 6).

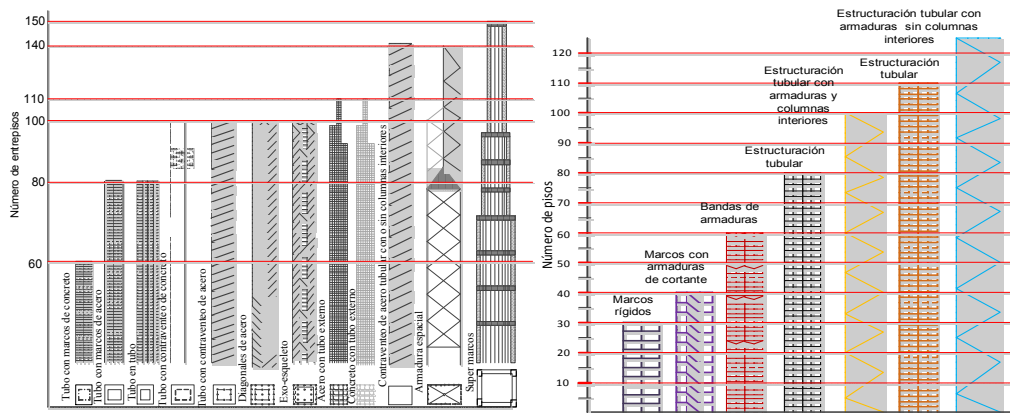


Figura 6: Estructuración de edificios altos (Mir y Kyoung, 2007).

En la Figura 7 se muestra un marco plano compuesto por columnas y vigas (modelo de una viga de cortante) y un muro de corte (modelo de una viga de flexión) unidos entre sí por conectores rígidos axialmente, se muestra también la viga en voladizo con las características de los dos modelos anteriores (Miranda y Taghavi, 2005).

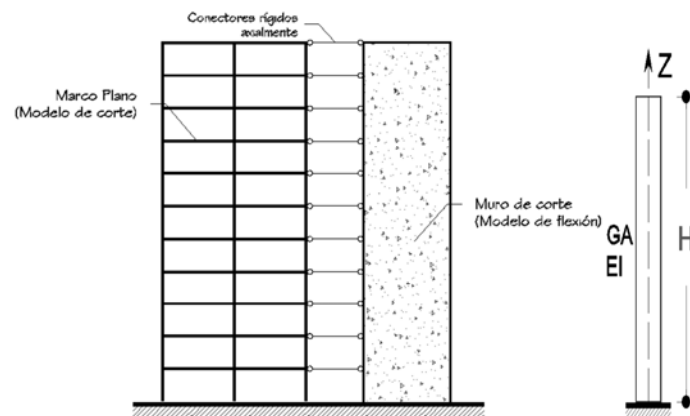


Figura 7: Modelo de una viga de corte acoplada a una viga por flexión.

La ecuación diferencial del modelo de la Figura 7, que representa el comportamiento de la viga acoplada flexión-cortante en vibración forzada con amortiguamiento es:

$$\frac{\rho}{EI_0} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \frac{c}{EI_0} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + \frac{1}{H^4} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \right] - \frac{\alpha_0^2}{H^4} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right] = - \frac{\rho}{EI_0} \frac{\partial^2 u_g(t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

donde $\rho(x)$ es la masa por unidad de altura del edificio, $u(x,t)$ es el desplazamiento lateral en el instante t a una altura adimensional x , es decir, es la relación entre la altura del entrepiso medido a partir del nivel del terreno y la altura total del edificio, $c(x)$ es el coeficiente de amortiguamiento por unidad de altura, $EI(x)$ es la rigidez a la flexión, $GA(x)$ es la rigidez a cortante del edificio, H es la altura total del edificio y $u_g(t)$ es el desplazamiento del terreno. El modelo se simplifica al considerar constante la masa por unidad de longitud y el coeficiente de amortiguamiento. Siguiendo el procedimiento

convencional de solución (Ortega, 2012) se puede escribir la ecuación de movimiento como,

$$\ddot{D}_i(t) + 2\xi_i\omega_i\dot{D}_i(t) + \omega_i^2 D_i(t) = -\ddot{u}_g(t)\Gamma_i \quad (3)$$

donde la respuesta dinámica es,

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^m \Gamma_i \varphi_i(x) D_i(t) \quad (4)$$

$$\Gamma_i = \frac{\int_0^1 \varphi_i(x) dx}{\int_0^1 \varphi_i^2(x) dx} \quad (5)$$

En este trabajo se considerará para el cálculo de la demanda de aceleraciones sísmica el registro sísmico del 30 de septiembre de 1999, en la estación SCT.

3.1 Ejemplo de aplicación

Se considera el modelo de viga de flexión acoplada con cortante para modelar el edificio con altura $H = 183\text{m}$, ancho del edificio $B = 30.48\text{m}$ y profundidad $D = 30.48\text{m}$, considerando 50 niveles en periodo fundamental es $T_1 = 5\text{s}$, la densidad másica del edificio es $\rho = 192.03 \text{ kg/m}^3$ y el amortiguamiento asociado al primero y segundo modo es, $\xi_1 = 0.05$ y $\xi_2 = 0.02$, respectivamente. Se considera que el edificio está sometido al sismo de servicio, registrado en la estación SCT el 30 de septiembre de 1999, y para valores de $\alpha_o = 0$ (comportamiento en flexión) y para $\alpha_o = 30$ (comportamiento como viga en cortante). Los valores de los desplazamientos normalizados y de las aceleraciones se muestran en la [Figura 8](#).

Cuando el edificio se modela considerándolo con un comportamiento de en flexión, $\alpha_o = 0$ el desplazamiento máximo obtenido es de 14.3 cm y la aceleración máxima en la parte superior del edificio es 0.066g. Sin embargo, se puede ver que si se considera como aceleración límite de servicio 0.03g, la aceleración en los entresijos del tercio medio hacia arriba no la rebasan, pero en la base y en la parte superior sí. Cuando el edificio es modelado con un comportamiento en cortante, $\alpha_o = 30$, el desplazamiento máximo es de 10.4 cm y la aceleración máxima es de 0.0875g, que se presenta en la parte alta del edificio. La aceleración de 0.03g es rebasada en la mayoría de los entresijos, excepto en los niveles entre 0.6 y 0.7 de la altura total del edificio.

Se puede observar que los desplazamientos para el edificio, considerándolo con un comportamiento por cortante, son menores a los obtenidos si se considera el edificio con un comportamiento en flexión. Sin embargo, las aceleraciones absolutas son al contrario, es decir, son mayores cuando el edificio se comporta como cortante que cuando se comporta como una viga de flexión. Si se considera como límite de servicio una aceleración de 0.03g como es el propuesto para el caso de aceleraciones producidas por el viento (Bungale, 2005) el edificio no satisface dicha condición.

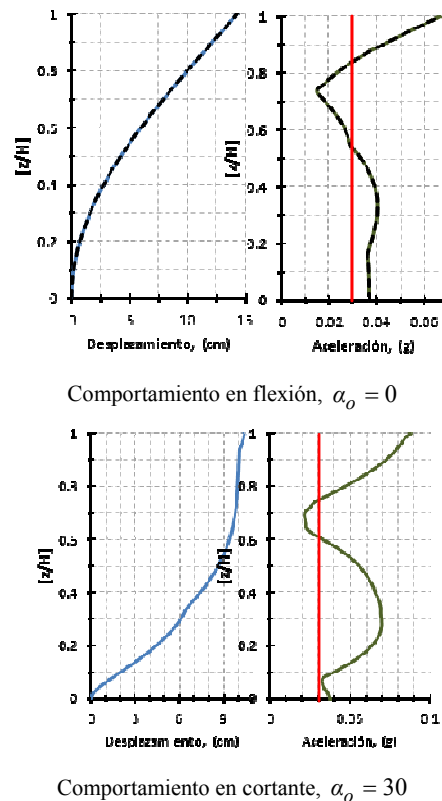


Figura 8: Respuesta del edificio ejemplo 1, sismo SCT de septiembre 30 de 1999.

4 CONCLUSIONES

En el RCDF (2004) actualmente no existe un lineamiento para considerar las aceleraciones eólicas de servicio por comodidad en edificios altos. Sin embargo, si se considera como límite de confort una aceleración de 0.03g la mayoría de los edificios construido en el DF no satisfacen este requisito para aceleraciones en la dirección perpendicular al flujo del viento.

Al comparar las aceleraciones sísmicas obtenidas para el ejemplo de aplicación considerando el edificio con un comportamiento similar al de una viga por flexión, misma hipótesis que se realiza en los códigos de diseño eólico, se puede ver que la aceleración en todo el edificio, excepto en los últimos niveles es menor a 0.04g, aceleración obtenida en el mismo ejemplo de aplicación en la dirección transversal al flujo del viento. Es decir, las condiciones sísmicas que produce el sismo de servicio en este ejemplo pueden ser menores a las que produce en viento.

Como trabajos futuros se recomienda verificar el efecto no lineal del amortiguamiento del edificio en las aceleraciones longitudinales, transversales y por torsión en edificios. Además de realizar la revisión del estado límite de servicio por aceleraciones en edificios ubicados en zona de fuertes vientos.

5 AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH, quién por medio de la Coordinación de la Investigación Científica proporcionó el apoyo necesario para la realización del proyecto 2012, “Comportamiento eólico bajo cargas de servicio de estructuras del grupo A”. De la misma manera se agradece al Ing. Carlos

Ortega V. estudiante de la maestría en estructuras de la FIC de la UMSNH.

REFERENCES

- ASCE/SEI 7-2005, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, *American Society of Civil Engineers*, ISBN 0-7844-0809-2, 2005.
- AIJ, Architectural Institute of Japan Recommendations for Loads on Buildings, Chapter 6, *Wind Loads*, 2004.
- AS/NZS 1170.0:2002, Australian/New Zealand Standard, Structural design actions, *Part 0: General Principles*, ISBN 0-7337 4469-9, 2005.
- Bungale, S.T., Wind and Earthquake resistant buildings, structural analysis and design, Marcel Dekker, ISBN 0-8247-5934-6, 2005.
- NRCC 48192, *National Research Council Canada, User's Guide-NBC 2005 Structural Commentaries (part 4 of Division B)*, ISBN 0-660-19506-2, 2005.
- MDOC, Manual de Diseño de Obras Civiles, "Diseño por Viento", *Comisión Federal de Electricidad-Instituto de Investigaciones Eléctricas*, México, 2008.
- Miranda, E. y Taghavi, S., Approximate floor acceleration demands in multistory buildings, I: Formulation. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 131 (2), 203-211, 2005.
- Mir A.A. y Kyoung, S.M., Structural Developments in Tall buildings: Current trends and Future Prospects, *Architectural Science Review*, V. 50-3, 205-223, 2007.
- Ortega J.C., Condiciones de servicio sísmico eólicas en México, *Tesis de Maestría en estructuras*, FIC-UMSNH, 2012.
- RCDF, Reglamento de Diseño del Distrito Federal, Normas Técnicas Complementarias, Diseño por Viento, *Departamento del Distrito Federal*, 2004.