

# Curvas de fragilidad eólica para edificios con amortiguadores viscosos

## Wind fragility curves for buildings with viscous dampers

Marco A. Santos-Santiago<sup>1</sup>, Sonia E. Ruiz<sup>1</sup>, Federico Valenzuela-Beltrán<sup>2</sup>

### RESUMEN

Se compara la fragilidad de edificios ante efectos del viento en términos de la aceleración de piso, para la evaluación del confort de sus ocupantes. La fragilidad se ilustra por medio del estudio de un edificio de 28 niveles con una gran área expuesta. El edificio se diseña de dos maneras: a) convencionalmente (sin amortiguamiento suplementario), y b) usando dispositivos disipadores viscosos no lineales. Las curvas de fragilidad se obtienen para tres umbrales de percepción de aceleración. Los resultados muestran que en el edificio con dispositivos viscosos, la aceleración de piso se reduce entre 6.5 y 10.3 veces, con respecto al edificio convencional, además, la probabilidad de exceder los umbrales de percepción se reduce de forma significativa.

Recibido: junio 2019  
Aceptado: octubre 2019  
Publicado: julio 2021

### Palabras Clave:

fragilidad estructural, edificios concreto y acero, aceleración de piso

### Keywords:

structural fragility, concrete and steel buildings, floor acceleration.

### ABSTRACT

The structural fragility associated with the wind effects on buildings is studied. The floor acceleration is used as demand parameter in order to assess the comfort of the occupants. The structural fragility is estimated for a 28-story building with a large exposed area. The building is designed in two alternative ways: a) conventionally (without supplemental damping), and b) using nonlinear fluid viscous dampers. Fragility curves are calculated from incremental dynamic analyses and considering three perception thresholds. Results show that for the building with viscous dampers the floor acceleration is reduced from 6.5 and 10.3 times with respect to that of the conventional building; in addition, the probability of exceeding the perception thresholds is reduced significantly.

## 1. INTRODUCCIÓN

El diseño estructural de edificios de mediana y gran altura en la Ciudad de México está dominado normalmente por el efecto de las fuerzas laterales causadas por movimientos sísmicos; sin embargo, para edificios altos con una gran área expuesta localizados en ciertas zonas de la ciudad, la acción del

\*Autor para correspondencia. Marcos A.Santos-Santiago.  
Dirección de correo electrónico: MSantosS@iingen.unam.mx.

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México

viento puede ser significativa desde el punto de vista del diseño de los componentes no estructurales y del control de vibraciones que redundan en confort de sus ocupantes. En la literatura existen diversos trabajos orientados al estudio de los umbrales de percepción de la aceleración de piso [1,2], así como propuestas de métodos simplificados para estimar los valores de aceleración [3]. Los estudios mencionan que la vibración excesiva de los edificios ante efectos del viento, puede generar interrupción de las actividades de los ocupantes e incluso sensación de inseguridad.

Existen diferentes alternativas de solución para mitigar los efectos del viento en una construcción. Estas medidas incluyen: cambiar la geometría del sistema estructural, incrementar su rigidez lateral o incluir sistemas de control que permitan reducir la respuesta del sistema estructural [4, 5]. Estos últimos han sido ampliamente usados por su eficiencia en el control de la respuesta ante efectos de viento y pueden ser del siguiente tipo: a) masas resonantes sólidas o líquidas (tuned mass dampers or tuned liquid dampers) [6, 7, 8, 9] o b) dispositivos que proporcionen amortiguamiento suplementario adicional. En este estudio se utilizan los últimos debido a que también han mostrado su eficiencia para controlar las vibraciones inducidas por sismo y por viento [5, 10, 11], además, existen lineamientos para su diseño en la mayoría de los códigos de construcción [12,13,14,15].

El objetivo de este estudio es evaluar la fragilidad eólica de dos edificios, usando como medida de demanda estructural la aceleración máxima de piso, y con ello discutir la eficiencia de los dispositivos disipadores de energía en el control de la respuesta estructural producida por el viento en edificios altos. Para ello, se estudian dos variantes de un edificio de 28 niveles formado por marcos de concreto y acero en sección compuesta, que se localiza en la Ciudad de México. El edificio se considera equipado con amortiguadores viscosos no lineales, y alternativamente, sin ellos.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología que se sigue se describe brevemente en los siguientes pasos:

1) Diseño estructural. El edificio se diseña de manera convencional (EC), y alternativamente, con dispositivos viscosos (DV); el diseño considera las acciones de sismo y viento, y se realiza de acuerdo con los lineamientos de la referencia [14].

2) Cargas dinámicas. Se simula un conjunto de señales correlacionadas en la altura para diferentes valores de velocidad de viento. Las señales de viento se transforman a señales de fuerzas usando la Ecuación 1.

$$F_i = -0.5C_{Pi} A_i V_i(t)^2 \quad (1)$$

donde:

$F_i$  es el vector de fuerzas asociadas al piso  $i$ , para una intensidad dada.

$C_{Pi}$  es el coeficiente de presión o arrastre de acuerdo con la geometría y la dirección de análisis.

$A_i$  es el área de expuesta al viento.

$V_i$  es el vector que contiene la señal de viento asociada al piso  $i$ , para una intensidad de referencia  $t$  es el tiempo en segundos.

3) Análisis dinámicos incrementales. Se evalúa la respuesta del sistema estructural sometido a un conjunto de señales obtenidas en el paso anterior para velocidades de referencia de diferente intensidad.

4) Curvas de fragilidad. Se obtienen curvas de fragilidad, las cuales representan la probabilidad condicional de exceder un determinado nivel de la demanda estructural, dada la ocurrencia de una medida de intensidad, de acuerdo con la Ecuación 2 [16].

$$P(PDE > d | MI) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{d}{D}\right)}{\sigma_{\ln D}}\right) \quad (2)$$

donde:

$MI$  es la medida de intensidad

$\Phi$  es la función de distribución normal acumulada

$D$ ,  $\sigma_{\ln D}$  son la mediana de la demanda y la desviación estándar del logaritmo natural de la demanda, respectivamente.

En este estudio se selecciona la velocidad media del viento como medida de intensidad, y como parámetro de demanda se considera la aceleración máxima de piso, que se clasifica de acuerdo con los siguientes umbrales de percepción [2]:

a) No perceptible, para aceleraciones de piso menores a 5 mili-g

b) Perceptible, para aceleraciones de piso menores a 10 mili-g

c) Altamente perceptible, para aceleraciones de piso menores a 25 mili-g

### 3. ILUSTRACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología se aplica a dos edificios de 28 niveles (114m de altura) diseñados de acuerdo con el Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México y sus Normas Técnicas Complementarias (2017). Ambos edificios están constituidos por marcos de concreto y acero en sección compuesta; la única diferencia es que el primero tiene un sistema de amortiguamiento diseñado para reducir las aceleraciones y desplazamientos debidos a acciones de sismo en la dirección Y; el segundo es un edificio diseñado de forma convencional. En lo que sigue se estudia las ventajas que tiene usar el sistema de amortiguamiento para controlar las aceleraciones inducidas por el viento. Las Figuras. 1 y 2 muestran la planta del edificio, la elevación en el eje A, y la elevación en el eje 1, respectivamente.

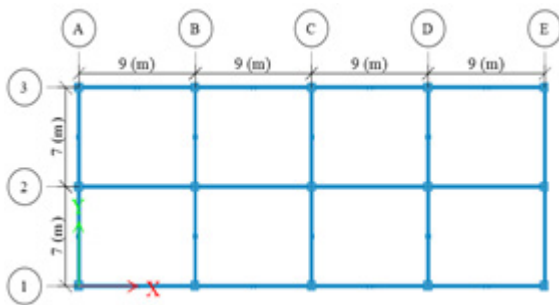


Figura 1. Vista en planta del edificio.

### 3.1 Diseño Estructural

#### Acciones Sísmicas

Para el diseño estructural se consideró un espectro de diseño sísmico de pseudo-aceleración correspondiente a suelo intermedio de la Ciudad de México (con un periodo dominante  $T = 1$  s). Se usaron los siguientes parámetros (de las NTCD-Sismo-2017[14]):

Para el edificio equipado con dispositivos viscosos (DV):

- Se realizó un diseño preliminar usando un factor de reducción por amortiguamiento  $\beta=0.52$  [14], el cual equivale a usar un espectro de diseño sísmico reducido con 22% de amortiguamiento crítico. Los detalles del proceso de diseño estructural se pueden consultar en las Refs. [11, 17].

El diseño estructural final se realizó usando análisis paso a paso no lineales.

Para el edificio convencional:

- Se consideró un valor de  $Q=2$  para el factor de comportamiento sísmico y el de sobre-resistencia  $R_0=1.75$ ,  $k_1= 1.0$  (dirección X),  $k_1=0.8$  (dirección Y),

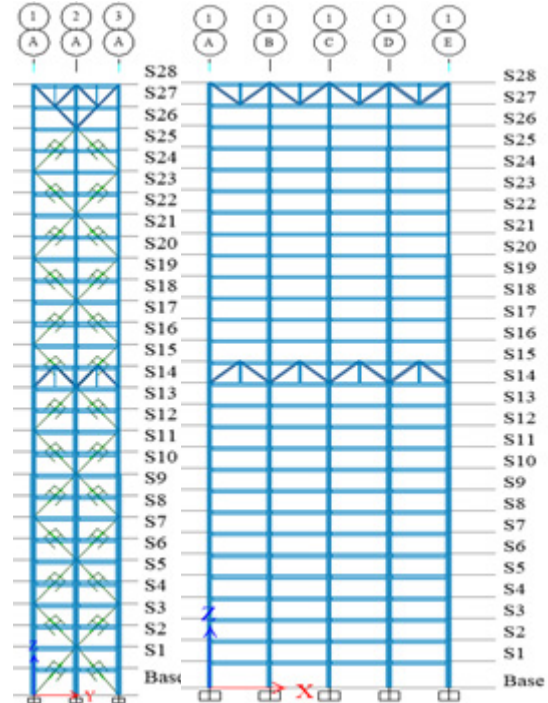


Figura 2. Elevación en el eje A y 1.

y  $k_2$  de acuerdo con la ecuación 3.5.2 de las NTC-Sismo-2017[14].

- Los límites de distorsión de entrepiso permisible son iguales a 0.015 para el estado límite de colapso, y 0.004 para el estado límite de servicio.

#### Acciones de Viento

Los parámetros básicos para el diseño por viento de acuerdo con las NTCD-Viento-2017 [14] son los siguientes:

- Velocidad regional,  $V_R = 30$  m/s (asociada a un periodo de retorno de 50 años)
- Velocidad regional correspondiente al estado límite de servicio,  $V_R = 23$  m/s (asociada a un periodo de retorno de 10 años). Aceleración máxima de piso igual a 20 mili-g
- Terreno tipo 3 (terreno plano)
- Rugosidad del terreno tipo R4 (zona con gran densidad de edificios). La altura gradiente ( $\delta$ ) igual a 455m y exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura  $\alpha$  igual a 0.170
- Factor de amplificación dinámica de acuerdo con la ecuación 5.0.1 de las NTCV-2017.
- Los coeficientes de presión considerados son: a) barlovento 0.8, b) sotavento -0.4, c) muros laterales -0.8 y d) -0.8 en techo

Las propiedades dinámicas del edificio se muestran en la Tabla 1.

### 3.2 Generación de Señales de Velocidad de Viento

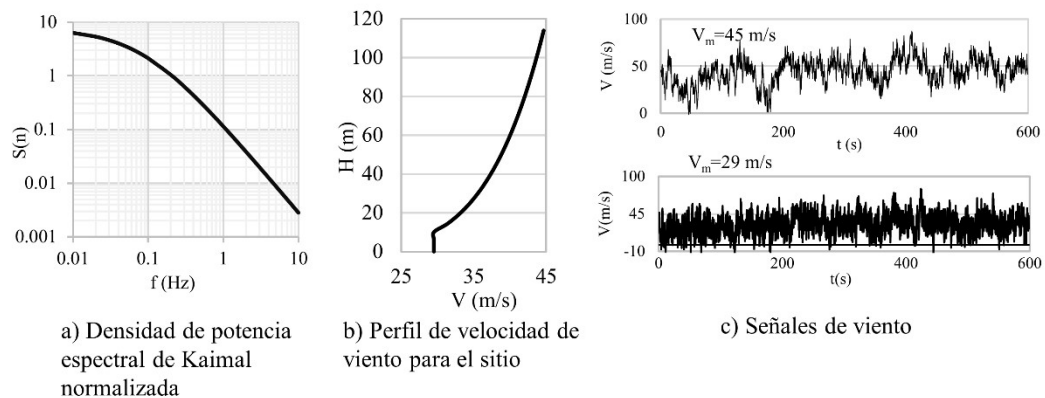
Las señales de velocidades de viento se simularon usando el programa SVTpro [18], el cual usa un Modelo Autorregresivo de Media Móvil (ARMA por sus siglas en inglés) [19]. El programa correlaciona la señal de velocidades de viento a lo largo de la altura. Para los análisis, se simularon 10 conjuntos de señales de velocidad de viento, cada uno de ellos se compone por 28 registros de velocidades de viento con 10 minutos de duración. Para la simulación se requiere el perfil medio de velocidad del viento que tome en cuenta la rugosidad del terreno y el grado de exposición de la estructura, además de la función de densidad de potencia espectral (PSD) la cual sirve para simular la turbulencia del viento. En la Figura 3a se muestra la PSD de Kaimal, mientras que en la Figura 3b se presentan el perfil de velocidades de viento, así como dos historias de velocidades de viento generadas a 10 m y 114 m, las que resultaron de una simulación.

### 3.3 Análisis Dinámicos Incrementales

La variación de la demanda estructural (en este caso la aceleración máxima de piso) respecto a una velocidad de viento, se estima por medio de análisis dinámicos incrementales, en los que se estima la respuesta del sistema estructural a diferentes intensidades de viento y no sólo para dos periodos de retorno como comúnmente se realiza en los códigos de diseño. Las

**Tabla 1. Propiedades dinámicas del edificio.**

Modo de vibración	Dirección X		Dirección Y	
	Periodo (s)	Peso efectivo (%)	Periodo (s)	Peso efectivo (%)
1	4.79	78.2	4.5	75.6
2	1.69	8.7	1.53	11.4
3	0.9	5.6	0.79	5.2

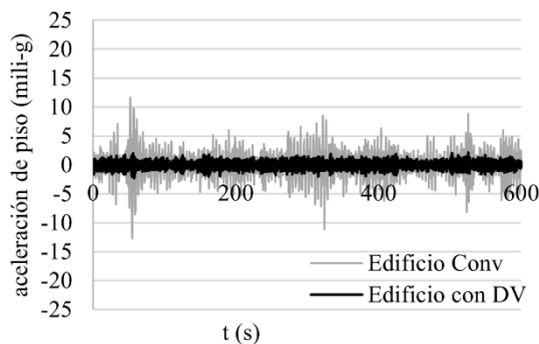


**Figura 3. Características del viento en la altura.**

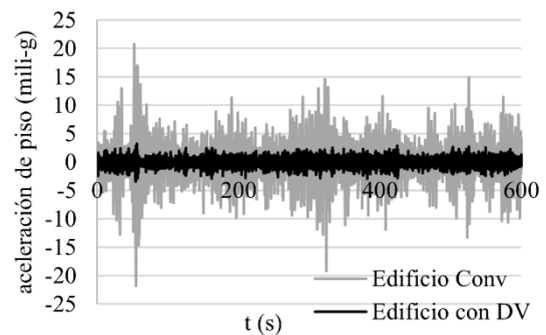
velocidades de viento consideradas varían desde 10 hasta 44 m/s, con incrementos de 2 m/s, y corresponden a una altura de referencia de 10m. Los análisis paso a paso se realizaron en el programa ETABS [20], en el cual se realizaron las siguientes consideraciones: a) el sistema de amortiguamiento se modela explícitamente por medio de elementos tipo “link” con constante de amortiguamiento  $C = 980.6 \text{ kN}(\text{s}/\text{mm})^\alpha$  y  $\alpha=0.5$ , b) el amortiguamiento inherente del sistema estructural se

modela mediante de una matriz de amortiguamiento de Rayleigh en donde todos los modos que contribuyen a la respuesta tienen una relación de amortiguamiento crítico menor a 1%.

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados de las historias de aceleración de piso para una simulación aleatoria con velocidades de viento de 23 y 31 m/s, respectivamente. En la Figura 4 se puede apreciar que en el edificio con dispositivos viscosos (DV) presenta



**Figura 4. Historia de aceleraciones del nivel 28 para una  $V=23$  m/s.**



**Figura 5. Historia de aceleraciones del nivel 28 para una  $V=31$  m/s.**

aceleraciones de piso hasta 6.5 veces menores que las del edificio convencional para una velocidad de viento de 23 m/s. De la misma forma, para una velocidad de viento de 31 m/s, las aceleraciones de piso son hasta 10.3 veces menores a las que presenta el edificio convencional (ver Figura 5), las relaciones fueron obtenidas en los picos de respuesta máxima del edificio convencional y en el mismo instante de tiempo. La Figura 6 muestra la respuesta de aceleración máxima del edificio convencional obtenida para 5 diferentes velocidades de viento. A partir de la Figura 6 se puede calcular la mediana y un parámetro de dispersión para

estimar la respuesta probabilista del sistema estructural asociada a cierta velocidad de viento.

### 3.4 Curvas de Fragilidad

Para el cálculo de las curvas de fragilidad se considera que la variación de la demanda estructural con la intensidad sigue una distribución de tipo lognormal [21]. Estas se expresan como función de la velocidad de referencia del viento y se calculan para los umbrales de percepción mencionados en la sección 2. La Figura 7 muestra las curvas de fragilidad de los dos sistemas estructurales en estudio, para los tres umbrales de percepción. A partir de estas curvas se pueden realizar los siguientes comentarios:

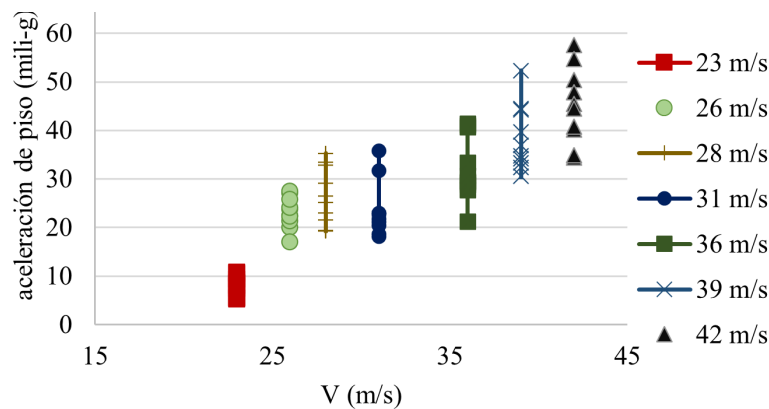


Figura 6. Aceleraciones máximas de piso para el edificio convencional.

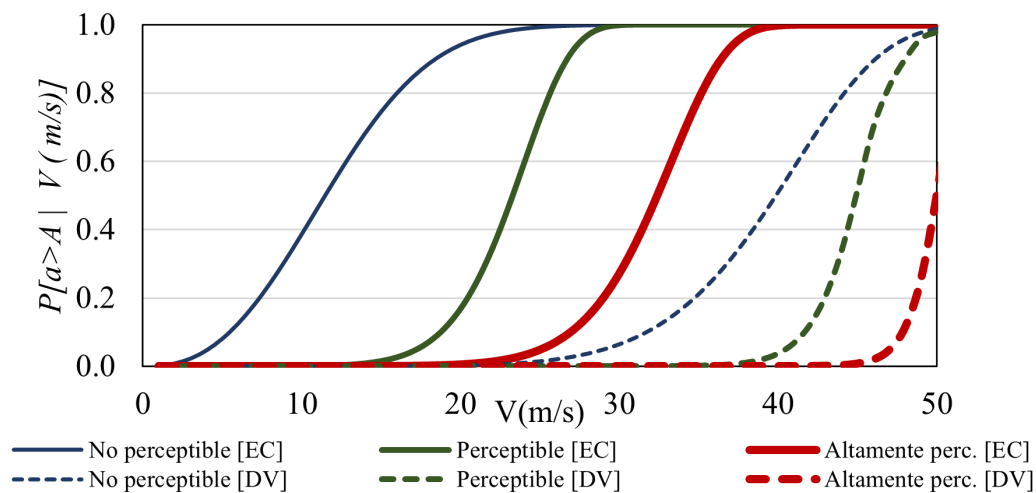


Figura 7. Curvas de fragilidad de percepción.



1. Las curvas de fragilidad del edificio equipado con dispositivos viscosos (líneas gruesas interrumpidas) tienden a ubicarse hacia la derecha respecto a las curvas del edificio convencional (líneas continuas). Esto indica que se requiere una intensidad mayor para exceder los umbrales de percepción establecidos.

2. Para una velocidad de viento de 23 m/s (velocidad para revisar es estado límite de servicio), existe una probabilidad del 46% de que la aceleración pueda exceder 10 mili-g, o bien, que el movimiento debido a la aceleración sea perceptible en el edificio convencional, mientras que para el edificio con DV la probabilidad de exceder el mismo umbral de percepción es 0%. De forma similar, para una velocidad de viento de 30 m/s (velocidad de diseño para la revisión de la seguridad contra colapso) existe una probabilidad del 27% de que la aceleración inducida por el viento sea altamente perceptible, por otro lado, en el edificio con DV apenas alcanza una probabilidad de 6.5% de exceder el umbral “no perceptible” para la misma velocidad de viento, esto indica que cuando el edificio con DV se encuentre sometido a altas velocidades de viento el movimiento será imperceptible.

#### 4. CONCLUSIONES

Se presentó una comparación de la fragilidad de dos sistemas estructurales en términos de la aceleración inducida por el viento. El edificio analizado se localiza en la Ciudad de México y se consideró con dispositivos viscosos, y alternativamente, sin ellos. Las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

1) Las curvas de fragilidad muestran que la probabilidad de excedencia de un cierto umbral de percepción, asociado a un nivel de velocidad de viento, es menor para un edificio equipado con DV que para uno con las mismas características, pero diseñado de manera convencional.

2) Los resultados indican que el edificio equipado con amortiguadores viscosos presentará un mejor comportamiento estructural que el edificio convencional bajo las acciones de viento que se esperan que ocurran en ese sitio en el futuro. La evaluación de los edificios se realizó en términos de la aceleración de piso, no obstante, la inclusión de dispositivos de amortiguamiento puede, además, reducir los desplazamientos laterales y los elementos mecánicos en los elementos estructurales.

3) Se espera que las curvas de fragilidad correspondientes a otras estructuras equipadas con amortiguadores sigan una tendencia similar a las mostradas en la Figura 7. La probabilidad de excedencia de un determinado parámetro de demanda estructural asociado a un nivel de intensidad dependerá de las características dinámicas de la estructura y del nivel de peligro eólico del sitio.

#### AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para sus estudios de posgrado. Esta investigación tuvo apoyo de la DGAPA-UNAM bajo el proyecto PAPIIT-IN100320.

#### REFERENCIAS

1. Pozos-Estrada A., Hong H P., Galsworthy J K. Serviceability design factors for wind-sensitive structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 37, 2010, p. 728-738.
2. Tamura Y, Kawana S, Nakamura O, Kanda J, Nakata S. (2006). Evaluation perception of wind-induced vibration in buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, paper 14507, Issue SB5, 2006, p. 283-293.
3. Pozos-Estrada, A. A simple procedure to evaluate the wind-induced acceleration in tall buildings: an application to Mexico. *Wind and Structures*, Vol.27, No. 5, 2018, 337-345, DOI: <https://doi.org/10.12989/was.2018.27.5.337>.
4. Yang J., Agrawal A. K., Samali B., Wu J. Benchmark problem for response control of wind-excited tall buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, Vo. 130 (4), 2004, p. 437-446.
5. Santos-Santiago M. A., Ruiz S. E., Valenzuela-Beltrán F. Multihazard risk assessment (seismic and wind) for buildings with dampers in Mexico City. *Proceedings of the 11th National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Los Angeles, CA 2018.*

6. Rüdinger F. Tuned mass damper with nonlinear viscous damping, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 300, 2007, p. 932-948.
7. Giaralis A., Petrini F. Wind-induced vibration mitigation in tall buildings using the tuned mass-damper-inerter. *Journal of Structural Engineering* Vol. 143 (9):04017127, 2017.
8. Pozos-Estrada A., Hong H. P. Sensitivity analysis of the effectiveness of tuned mass dampers to reduce the wind-induced torsional responses. *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 12, 2015, p. 2520-2538.
9. Soto-Brito R., Ruiz S. E. Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 28, 1999, p. 1255-1271.
10. Santos-Santiago, M. A., Ruiz S. E., Valenzuela-Beltrán F. Wind-induced vibration control of buildings equipped with non-linear viscous dampers, *Vibroengineering PROCEDIA*, Vol. 21, 2018, p. 119-124. <https://doi.org/10.21595/vp.2018.20315>.
11. Zhiqiang Z., Aiqun L., Jianping H., Jianlei W. Wind-induced vibration control of Hefei TV tower with fluid viscous dampers. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, Vol 3, 2009, p. 249-254.
12. ASCE SEI 7-16. Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers, 2016, p. 181-196.
13. Constantinou M., Symans M. Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers. Technical Report NCEER-92-0032. 1992.
14. Gobierno de la Ciudad de México, Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México y sus Normas Técnicas Complementarias, 2017.
15. Ruiz S. E. Review of guidelines for seismic design of structures with damping systems, *The Open Civil Engineering Journal*, Vol. 12, 2018, 195-204.
16. Cornell A., Jalayer F., Hamburger R., Foutch D. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines, *Journal of Structural Engineering*, vol. 128 (4), 2002, p. 526-532.
17. Santos M. A., Ruiz S. E., Santos A., Valenzuela F. Comparación de dos métodos simplificados para el diseño de edificios con amortiguadores viscosos no-lineales. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 2017.
18. Ortegón J, Pozos A. Educational software for wind engineering applications on structures. 6th Structural Engineers World Congress, 2017. <https://proyectos.iingen.unam.mx/genesissimvt-svtpro/es-mx/Paginas/default.aspx>
19. Samaras E., Shinozuka M. ARMA Representation of random processes. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 111 (3), 1985, p. 449-461.
20. Computer and Structures, ETABS V16.2.1, 2016. Berkeley California.
21. Bernardini E, Seymour M, Spence J, Dae-Kun K, Kareem A. Performance-based Design of High-Rise Buildings for Occupant Comfort. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 141(10): 04014244, 2015.