

Comparación de las dos metodologías de análisis y diseño más recientes de ASCE 7, para el análisis de su posible empleo en edificaciones con aislamiento sísmico de base en Colombia

Comparison among both most recent analysis and design methodologies of ASCE 7, for the analysis of its possible use in buildings with seismic base isolation in Colombias

Carlos M. Piscal A.*

Universidad de La Salle, Colombia

Francisco López Almansa**

Universidad Politécnica de Cataluña, España

*PhD, Universidad Politécnica de Cataluña, Docente Universidad de la Salle, Programa de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia. cpiscal@unisalle.edu.co

**PhD, Docente Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Tecnología de la Arquitectura, Barcelona, España. francesc.lopez-almansa@upc.edu

Correspondencia: Carlos Mario Piscal. Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Carrera 2 # 10-70, Bogotá, Colombia. Tel. (+571) 3535360.

Subvenciones: Colciencias (Convocatoria 617).

Resumen

El aislamiento de base es una técnica de protección sismorresistente para edificaciones, con un uso exitoso y amplio a nivel mundial. En Colombia actualmente existen algunos edificios que incorporan esta técnica, los cuales fueron diseñados bajo los requisitos de normativas americanas vigentes en la época, como, por ejemplo, ASCE 7-10. Dicha normativa ha sido recientemente actualizada a su versión 2016, con importantes cambios técnicos respecto a su predecesora. ASCE 7-16 incorpora resultados de las investigaciones más recientes en cuanto a aislamiento sísmico se refiere, por ende, las futuras edificaciones que se diseñen y construyan en el país bajo esta técnica deberían seguir dicho documento. Es por todo lo anterior que en el presente trabajo se evidencia la necesidad de realizar un análisis de la nueva filosofía de diseño para edificaciones con aislamiento de base y discutir su aplicabilidad en el país.

Palabras claves: aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia, diseño de edificaciones aisladas con ASCE 7-10, diseño de edificaciones aisladas con ASCE 7-16, Reglamento NSR-10.

Abstract

Base seismic isolation is a seismic protection technique for buildings, successful and with great use worldwide. In Colombia there are currently some buildings that incorporate this technique, which have been designed under the requirements of American regulations in force at the time, such is the case of ASCE 7-10. Aforementioned regulation has been recently updated to its 2016 version, with important technical changes with respect to its predecessor. ASCE 7-16 incorporates the results of the most recent research in terms of seismic isolation, future buildings that use this technique and that are designed and built in the country should follow this document. For all the aforementioned, it is evident the necessity of make an analysis of the new design philosophy for buildings with base isolation and discuss its applicability to the country.

Keywords: seismic isolation of buildings in Colombia, design of seismic isolated buildings with ASCE 7-10, seismic isolated buildings with ASCE 7-16, NSR-10 code.

Fecha de recepción: 19 de junio de 2018
Fecha de aceptación: 13 de octubre de 2018

I. INTRODUCCIÓN

El aislamiento sísmico de base consiste, por lo general, en incorporar entre el suelo de cimentación y la estructura una serie de dispositivos (aisladores) altamente flexibles en dirección horizontal, pero rígidos en la dirección vertical [1]. Lo anterior con la finalidad de desacoplar la estructura del suelo a fin de controlar la demanda sísmica y, por ende, el daño excesivo en la estructura principal (superestructura).

El comportamiento de edificaciones con aislamiento de base se ha reportado como satisfactorio cuando estas se han visto expuestas a sismos severos. Países como Chile [2], Japón [3], China [4], o EE. UU. [5], entre otros, cuentan con evidencia científica de este comportamiento.

En Colombia, desde el 2011 hasta hoy, se han diseñado y construido aproximadamente 30 edificaciones [6] que emplean esta tecnología de protección sísmica. Debido a que el país no cuenta con una normativa propia para el diseño de este tipo de edificaciones, estas debieron diseñarse de acuerdo con los lineamientos de documentos americanos como FEMA 450 [7] o ASCE 7-10 [8], los cuales, además de que eran documentos vigentes para la época, son los que sugiere seguir el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-10) [9].

Al ser el documento ASCE 7 de gran relevancia y referencia para el país en temas de diseño sismoresistente de edificaciones, en su versión más reciente (ASCE 7-16), publicada en los primeros meses del 2018, es objeto de estudio en el presente trabajo, con el fin de identificar y analizar los cambios técnicos más importantes que dicha versión tiene con respecto a su antecesora, y discutir la pertinencia de su futura aplicabilidad directa en el contexto local.

II. METODOLOGÍA

Con el propósito de llevar a cabo el presente estudio se ha desarrollado una comparación detallada entre las dos versiones más recientes del código americano [8], [10], empleado en el diseño de edificaciones con aislamiento sísmico. En el código, en el capítulo 17, "Aislamiento sísmico de edificaciones", se presentan importantes cambios técnicos [11], de los cuales a continuación se desarrollan los que, a criterio de los autores del

presente artículo, podrían generar más controversia en su futura aplicación en Colombia. Además de la comparación, se analiza la procedencia de los importantes cambios generados y se explica el porqué de estos, todo lo anterior de acuerdo con el criterio de los autores del presente trabajo.

A. Componentes en, sobre o que atraviesen la interfaz de aislamiento

En ASCE 7-16, la respuesta dinámica de este tipo de elementos estructurales y no estructurales debe ser determinada con rigor, y se debe garantizar — en aquellos elementos que lo requieran — que las deformaciones permanentes a largo plazo no afecten su funcionamiento.

B. Desempeño sísmico esperado en edificaciones con aislamiento de base

De acuerdo con ASCE 7, el desempeño sísmico esperado para edificaciones con aislamiento de base (*a*) y edificaciones con base fija (*f*) se muestra en la Tabla 1. Se evidencia que toda estructura aislada debe tener un mayor nivel de desempeño con respecto a edificaciones con base fija, sobre todo cuando se encuentren expuestas a sismos moderados y severos.

Tabla 1. Desempeño esperado para edificaciones con base fija y edificaciones con aislamiento de base

Medida del desempeño	Sismo		
	Frecuente	Moderado	Fuerte
Seguridad a la vida: no se espera pérdida de vidas o serias lesiones	<i>f, a</i>	<i>f, a</i>	<i>f, a</i>
Daño estructural: no se espera daño estructural significativo	<i>f, a</i>	<i>f, a</i>	<i>a</i>
Daño no estructural: no se espera daño significativo a los elementos no estructurales ni al contenido	<i>f, a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>

Fuente: adaptado de [10]

El desempeño de la edificación con base fija que se presenta en la Tabla 1 se refiere a una edificación con grupo de uso IV, catalogada como indispensable en el Reglamento NSR-10. Si lo anterior se representa de una manera más ilustrativa se obtiene la comparación presentada en la Tabla 2.

Tabla 2. Desempeño esperado para edificaciones con base fija grupo de uso IV y edificaciones con aislamiento de base

APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA DE ASCE 7-16 PARA EL DISEÑO SISMO RESISTENTE DE EDIFICACIONES CON AISLAMIENTO DE BASE EN COLOMBIA

Sismo	Nivel de desempeño			
	Operacional (FO)	Ocupación inmediata (IO)	Seguridad a la vida (LS)	Prevención del colapso (CP)
Frecuente*	● Edificación con base fija			Desempeño no adecuado
Moderado**	● Edificación aislada			
Fuerte***	▲		●	

Fuente: adaptado de [9], [10], [12]

(*) $T_R = 72$ años; (**) $T_R = 475$ años; (***) $T_R = 2475$ años

La Tabla 1 y la Tabla 2 permiten concluir que el nivel de desempeño esperado en edificaciones con base fija depende del tipo de sismo considerado y del tipo de edificación a diseñar, mientras que para edificaciones con aislamiento de base todo tipo de edificación debe tener como mínimo un nivel de desempeño operacional para el sismo fuerte.

En la Tabla 2 se representa el desempeño de edificaciones con aislamiento de base únicamente para el sismo más fuerte, entendiéndose que bajo sismos inferiores dicho desempeño sería más alto, lo cual se indica mediante la línea con la flecha de tendencia mostrada.

C. Periodo de retorno del sismo de diseño para la superestructura y subestructura

Uno de los cambios más notables que ha presentado ASCE 7-16 es la consideración de un sismo de diseño con periodo de retorno de 2475 años para el diseño de la superestructura y la subestructura. En la versión anterior de ASCE se estipulaba, para el diseño de estos elementos, un sismo con periodo de retorno de 475 años.

Como se evidenció en la Tabla 2, se espera que el desempeño para edificaciones con aislamiento de base sea mayor al obtenido en edificaciones indispensables con base fija. Se debería entonces emplear el mismo sismo de diseño en los dos casos (edificaciones aisladas y edificaciones con base fija) a fin de evidenciar tal objetivo.

Al tomar como punto de partida el desempeño de edificaciones con base fija mostrado en la Tabla 3, se puede analizar que este depende del sismo de diseño y del grupo de uso de la edificación. Si el nivel de desempeño se fija tal como se ha estipulado en las normativas a nivel internacional, en "Seguridad a la vida", para una edificación de grupo de uso I, este desempeño corresponde al sismo de diseño moderado ($T_R = 475$ años), mientras para edificaciones del grupo de uso IV corresponde al sismo de diseño fuerte ($T_R = 2475$ años). Es claro entonces que el sismo de diseño para edificaciones esenciales con base fija es de 2475 años. En la práctica actual colombiana se ha venido considerando dicho sismo de manera indirecta, al multiplicar el sismo de diseño de 475 años por un factor denominado "de importancia" equivalente a 1,5. Este último valor es exactamente el mismo que emplea ASCE para pasar del sismo moderado al fuerte [10].

Por tanto, es totalmente coherente usar como periodo de retorno para edificaciones con aislamiento de base y grupo de uso IV el correspondiente al sismo fuerte, eso sí bajo la premisa de obtener de forma directa un mejor desempeño que una edificación indispensable con base fija y el mismo grupo de uso.

La razón de emplear un sismo con periodo de retorno igual a 475 años en ASCE 7-10 obedece a que en dicho documento se incorporan factores de seguridad que, de acuerdo con los autores de la norma, intentan expresar el efecto producido por el sismo fuerte de manera indirecta. Esto quiere decir que las dos metodologías planteadas en las dos versiones de ASCE 7 tienen el mismo objetivo, sin embargo, lo intentan cumplir de formas totalmente distintas y, por ende, la gran mayoría de aspectos de una versión son totalmente incompatibles con la otra, lo cual restringe la posibilidad de pensar en una futura norma colombiana que adapte partes de cada una de ellas.

Tabla 3. Desempeño esperado para edificaciones con base fija grupo de uso I y IV

Sismo	Nivel de desempeño			
	Operacional (FO)	Ocupación inmediata (IO)	Seguridad a la vida (LS)	Prevención del colapso (CP)
Frecuente*				Desempeño no adecuado
Moderado**				Grupo de uso IV
Fuerte***				

Fuente: adaptado de ([9], [10], [12])

(*) $T_R = 72$ años; (**) $T_R = 475$ años; (***) $T_R = 2475$ años

D. Grado de disipación de energía requerido para las estructuras aisladas

ASCE 7 considera que una estructura aislada debe tener el mismo nivel de disipación de energía que una estructura con base fija; sin embargo, en su versión más reciente hay una excepción, ya que se permite el uso de pórticos de acero arriostrados concéntricamente con capacidad de disipación de energía mínima (incluye las conexiones), como sistema de resistencia a fuerzas sísmicas en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta, siempre y cuando se cumplan ciertos requisitos de seguridad, tales como: (a) altura de la edificación menor o igual a 48,4 m; (b) el valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía R debe ser igual a 1,0; y (c) se debe incrementar el desplazamiento total máximo (DTM) por un factor de 1,2.

Lo anterior indica la posibilidad de, en un futuro, emplear niveles de disipación inferiores en estructuras aisladas con respecto a estructuras con base fija, criterio muy coherente con el nivel de desempeño esperado en las primeras, lo cual puede incentivar la implementación de aislamiento con mayor frecuencia en estructuras antes no consideradas.

E. Coeficiente de importancia

Siempre se considera igual a 1, ya que independientemente del uso que tenga la edificación aislada, el desempeño esperado es el mismo y, por tanto, se considera un único sismo de diseño.

F. Derivas

El límite de deriva para edificaciones con aislamiento de base está definido como $0,015 h_{sx}$, donde h_{sx} es la altura de entrepiso. Este valor es diferente al que se usa en edificaciones con base fija por dos razones: (a) el sismo de diseño asociado a este límite de deriva es de 2475 años; (b) el desempeño esperado para cualquier estructura aislada va a ser el mismo sin importar su uso.

Este límite de deriva, aunque es un valor elevado, indica un nivel de desempeño mayor al de edificaciones con base fija, ya que con dicho valor se espera un desempeño cercano al de ocupación inmediata para el sismo máximo esperado. Lo anterior contradice lo que se presenta en la Tabla 1 y la Tabla 2 e indica un nivel de desempeño operacional, pero parece ser un poco más coherente en cuanto al nivel de exigencia que se le podría solicitar a este tipo de edificaciones.

G. Irregularidades

El manejo que se da a las implicaciones de tener irregularidades en ASCE 7-16 es diferente al estipulado en NSR-10, de ahí que este ítem se deba manejar con sumo cuidado.

Como primer aspecto, es claro que la definición de estructura regular o irregular permitirá la aplicación de uno u otro método de análisis. En segundo lugar, cada irregularidad implicará una penalidad, bien sea en aspectos relacionados con la categoría de diseño sísmico permitida (relacionada al nivel de disipación de energía) cuando la irregularidad esté presente [10], o bien al uso de factores que modifican el coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas de diseño básico R_o [9].

La cantidad de irregularidades consideradas en edificaciones con aislamiento de base difiere de aquellas consideradas en edificaciones con base fija para la nueva versión de ASCE, ya que en las primeras se espera un impacto menor en el comportamiento estructural de la edificación cuando estas se encuentren presentes [13], [14]; además, algunas irregularidades pueden suprimirse con una adecuada distribución de rigideces en el sistema de aislamiento.

Las irregularidades consideradas en edificaciones con aislamiento sísmico, de acuerdo con ASCE 7-16, son:

- En altura: 1aA, 1bA relacionadas con la variación de la rigidez de los entrepisos; 5aA, 5bA relacionadas con la variación de la resistencia de los entrepisos.
- En planta: 1bP relacionada con la irregularidad torsional extrema.

H. Factor de redundancia

La redundancia estructural está relacionada con el grado de hiperestaticidad presente en las estructuras. En edificaciones con base fija la ductilidad y la redundancia estructural son los medios más efectivos para proporcionar seguridad contra el colapso y los daños excesivos [15]. A fin de cumplir este objetivo, las estructuras con base fija que carecen de redundancia estructural se penalizan con un incremento en las cargas sísmicas actuantes. En edificaciones con aislamiento de base, de acuerdo con su filosofía, no se esperan daños excesivos ni colapso, por el contrario, se espera un comportamiento muy cercano al elástico; sin embargo, en la nueva versión de ASCE se aclara que debe asignarse un factor de redundancia que incremente las fuerzas sísmicas solo en aquellas estructuras clasificadas como irregulares.

I. Metodologías de análisis estructural

Básicamente, son las mismas empleadas en el análisis de edificaciones con base fija (FHE = fuerza horizontal equivalente, ADE = análisis dinámico elástico espectral, y ADC = análisis dinámico cronológico), y se pueden aplicar siguiendo las recomendaciones de la Tabla 4.

Tabla 4. Métodos de análisis aplicables para edificaciones con aislamiento de base

Condiciones de sitio o criterios de configuración	FHE	ADE	ADC
Condiciones de sitio			
Suelo blando (E o F)	NP	NP	P
Configuración de la superestructura			
Superestructura flexible	NP	NP	P
Superestructura irregular	NP	NP	P
Superestructura no lineal	NP	NP	P
*h>4pisos, *h>19.8m, $T_M > 5$ s	NP	NP	P
$T_M \leq 3T$	NP	P	P
Sistema de aislamiento			
$\beta_M > 30\%$	NP	NP	P
Sistema de aislamiento con alta no linealidad o sistemas que no cumplen los criterios del ítem 7, 17.4-1 (ASCE 7-16)	NP	P	P

Fuente: adaptado de [10].

*Estos límites pueden ser mayores si no hay tensión o levantamiento de los aisladores.

T = Periodo elástico de la edificación con base fija; = amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento al máximo desplazamiento, NP = no permitido, P = permitido.

ASCE 7-16 ha reducido el nivel de exigencia para la aplicación del método FHE, y, por el contrario, ha incrementado el número de requisitos para ADE. Esto tiene su fundamento en el hecho de que, realizar un análisis dinámico elástico espectral en edificaciones cuyos modos altos no tienen un alto porcentaje de participación, no tiene mucho sentido. Se vislumbra que en el futuro el método ADE se elimine y se extienda el uso de ADC.

J. Distribución de fuerzas sísmicas por nivel

A pesar de que en estructuras con aislamiento de base se esperan grandes deformaciones para el sistema de aislamiento, y un comportamiento similar al de cuerpo rígido para la superestructura [16] — lo que implicaría deformaciones uniformes para esta y, por ende, una distribución uniforme de fuerzas en elevación —, ASCE 7-10 y ASCE 7-16 consideran distribuciones de fuerzas no uniformes para cada nivel (p. ej., triangular, parabólico, etc.). En

ciertos casos, la distribución de fuerzas estipulada en ASCE 7-16 implicará mayores demandas para la superestructura, ya que el punto de aplicación de la resultante de las cargas se desplazará hacia la parte superior de la edificación, lo cual generará posibles altas tensiones en los aisladores.

La nueva expresión para la distribución de cargas sísmicas en cada nivel ha sido adaptada en ASCE 7-16 debido a los importantes resultados de investigaciones recientes [17]. Además, dicha metodología resuelve el problema que se presentaba en la anterior expresión cuando se tenían entresijos con peso considerable ubicados a una distancia muy corta del sistema de aislamiento.

K. Propiedades mecánicas de los dispositivos empleados

ASCE 7-10 menciona la importancia de incluir la variación de las propiedades mecánicas de los dispositivos, sin embargo, no define una metodología para incorporar dicha variable. ASCE 7-16 incorpora una serie de factores que permiten estimar las propiedades máximas y mínimas de los dispositivos de acuerdo con parámetros tales como la edad, las condiciones ambientales, de fabricación, etc.

L. Estimación de los desplazamientos de diseño

En ASCE 7-10 se estiman los desplazamientos de diseño en consideración a un periodo efectivo, calculado con las propiedades mínimas del sistema de aislamiento, y a un amortiguamiento efectivo correspondiente a las propiedades máximas; lo anterior, al ser una medida conservadora y poco realista, pretendía obtener valores de desplazamientos altos. ASCE 7-16 calcula los desplazamientos de diseño para los dos posibles casos: propiedades mínimas y máximas, al seleccionar el caso más crítico. Esto indica de nuevo que las dos versiones de ASCE no son compatibles, a pesar de que buscan el mismo objetivo.

M. Fuerzas y desplazamientos laterales mínimos en estructuras aisladas

Cuando se estimen las fuerzas y desplazamientos mediante análisis dinámicos, los valores calculados no deben ser inferiores a ciertos porcentajes de los estimados mediante FHE. Un resumen de estos requisitos se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Fuerzas y desplazamientos laterales mínimos

Sistema de aislación y elementos estructurales debajo del sistema de aislación			
Propiedad	ASCE 7-10	ASCE 7-16	
Fuerza mínima	90% V _b	90% V _b	
Desplazamiento mínimo	90% D _{TD} 80% D _{TM}	80% D _{TM}	
Elementos estructurales encima del sistema de aislamiento			
Fuerza mínima	Método de análisis	ASCE 7-10	ASCE 7-16
	ADE	80% V _s si es regular 100% V _s si es irregular	100% V _s
	ADC	60% V _s si es regular 80% V _s si es irregular	100% de los límites de V _s si es regular o irregular (17.5.4.3)

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La comparación y el análisis realizados permiten evidenciar que los principales cambios entre las dos versiones se dan en los siguientes aspectos:

- *Nivel de amenaza considerada para el diseño de la super y subestructura.* ASCE 7-16 presenta un importante cambio en este aspecto, ya que el diseño de todos los elementos de la estructura aislada se lleva a cabo con un sismo que posee un periodo de retorno de 2475 años (475 años en ASCE 7-10).
- *Definición de irregularidades.* ASCE 7-16 solo considera algunos tipos de irregularidades para estructuras aisladas, mientras ASCE 7-10 clasifica la regularidad de este tipo de estructuras de la misma forma que en edificaciones con base fija.
- *Métodos de análisis.* ASCE 7-16 es más restrictivo en el uso de métodos de análisis simplificados, sobre todo en el análisis dinámico elástico espectral.
- *Distribución de fuerzas sísmicas.* ASCE 7-16 considera una distribución de fuerzas sísmicas variable, además del hecho de tener diafragmas con gran peso cerca al sistema de aislamiento. ASCE 7-10 siempre considera una distribución de fuerzas triangular y, en ciertos casos, dicha distribución es menos exigente que en la nueva versión.

- *Propiedades mecánicas de los dispositivos.* ASCE 7-16 presenta una metodología clara y concisa para tener en cuenta esta importante variable.
- *Calculo de desplazamientos de diseño.* ASCE 7-16 presenta una metodología clara y coherente, en la que se usan de forma independiente las propiedades máximas y mínimas del sistema de aislamiento, en aras de estimar los desplazamientos de diseño a través de metodologías de análisis aproximadas.
- *Fuerzas y desplazamientos laterales mínimos.* De forma coherente con el ítem de métodos de análisis ASCE 7-16 es más restrictivo, en cuanto a límites se refiere, para la metodología de análisis dinámico elástico espectral.

IV. CONCLUSIONES

Existe una notable diferencia en la metodología planteada para el diseño de edificaciones con aislamiento de base entre las dos versiones más recientes de ASCE 7.

A pesar de que la metodología de diseño cambia, el nivel de desempeño esperado para este tipo de estructuras pretende ser el mismo.

El código americano para edificios con aislamiento sísmico está diseñado, principalmente, para incorporar dicha técnica en edificaciones indispensables.

La nueva versión de ASCE 7-16 no es aplicable de forma directa al país. Se deben realizar importantes adaptaciones y tener en cuenta el tipo de edificaciones al que estaría dirigido dicho documento.

No hay compatibilidad de forma entre las dos versiones más recientes de ASCE, por lo cual no se recomienda combinarlas para su aplicación en Colombia.

REFERENCIAS

- [1] N. Molinares Amaya, "Sistemas de control pasivos y activos de aislamiento de base para edificios sometidos a acciones sísmicas", *Rev. Científica Ing. Desarrollo.*, vol. 14, n.º 14, pp. 60-92, 2011.
- [2] J. Almazán, "Comportamiento de estructuras antisísmicas durante el terremoto del Maule y su posible efecto en las normas de diseño sísmico en Chile", *Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural*, vol. 7, n.º 2&3, pp. 4-28, 2012.

- [3] Earthquake Engineering Research Institute (EERI), "Performance of Engineered Structures in the Mw 9.0 Tohoku, Japan, Earthquake of March 11, 2011", *Special Earthquake Report*, 2012.
- [4] Earthquake Engineering Research Institute (EERI), "Institute The Mw 6.6 Earthquake of April 20, 2013 in Lushan, China", *Special Earthquake Report*, 2013.
- [5] S. Nagarajaiah y X. Sun, "Seismic performance of base isolated buildings in The 1994 Northridge earthquake", en *Proc. 11th WCEE. Paper*, 1996.
- [6] W. Mason, "Seismic isolation-the gold standard of seismic protection", *STRUCTURE magazine*, 2015.
- [7] *Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, National Earthquake Hazards Reduction Program, FEMA 450 standard, 2004.
- [8] *Minimum design loads for buildings and other structures*, American Society of Civil Engineers, vol. 7., ASCE standard 7-10, 2010.
- [9] *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, NSR-10.2010.
- [10] *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*, American Society of Civil Engineers, vol. 7, ASCE standard 7-16, 2016.
- [11] R. Mayes, "The next generation of codes for seismic isolation in the United States and regulatory barriers to seismic isolation development", en *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering*, 2014.
- [12] *Performance based seismic engineering of buildings*, Structural Engineers Association of California, VISION 2000 standard, 1995.
- [13] M. De Stefano y B. Pintucchi, "A review of research on seismic behavior of irregular building structures since 2002", *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 6, n.º 2, pp. 285-308, 2008.
- [14] I. Doudoumis, "Effects of vertical irregularities on the seismic behavior of multi-story buildings with base isolation", en *4th European workshop on irregular and complex structures*, 2005.
- [15] A. Tena, J. Cortés y E. Godínez, "Impacto de la redundancia estructural en el comportamiento sísmico de estructuras de concreto reforzado", *Alternativas*, vol. 17, n.º 3, pp. 180-197, 2016.
- [16] F. Cheng, H. Jiang, y K. Lou, *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. EE. UU., CRC Press, 2008.
- [17] K. L. Ryan y K. York, "Vertical distribution of seismic forces for simplified design of base-isolated buildings", en *New Horizons and Better Practices*, American Society of Civil Engineers, 2007, pp. 1-10.