

Aplicabilidad del código ASCE 7-16 para el diseño de edificaciones con aislamiento sísmico en Colombia

Carlos Mario Piscal-Arévalo (1), Francisco López-Almansa (2)

(1) Profesor Asociado, Programa de Ingeniería Civil, Universidad de La Salle, Bogotá, cpiscal@unisalle.edu.co
(2) Profesor, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Tecnología de la Arquitectura, Barcelona, francesc.lopez-almansa@upc.edu

Resumen

El aislamiento de base es una técnica de protección sismorresistente para edificaciones, con amplio y exitoso uso a nivel mundial. En Colombia actualmente existen algunos edificios que incorporan esta técnica, los cuales fueron diseñados bajo los requisitos de la normativa americana vigentes en la época, como ASCE 7-10. Dicho documento ha sido recientemente actualizado a su versión 2016, con importantes cambios técnicos respecto a su predecesor. ASCE 7-16 incorpora resultados de las investigaciones más recientes en cuanto a aislamiento sísmico se refiere; en consecuencia, las futuras edificaciones que empleen esta técnica y que sean diseñadas y construidas en el país deberían seguir dicha regulación. Por todo lo anterior, en el presente trabajo se evidencia la necesidad de hacer un análisis de esta nueva estrategia de diseño (para edificaciones con aislamiento de base) y discutir su aplicabilidad en el país.

Palabras-Clave: Aislamiento de base (sísmico), Colombia, ASCE 7-16

Abstract

Base isolation is a successful and worldwide used seismic protection technique for buildings. In Colombia there are some buildings that incorporate this technology; were designed by following the current American regulations, namely ASCE 7-10. This document has been recently updated to its 2016 version, with important changes. ASCE 7-16 incorporates the results of the most recent research; thus, apparently, future isolated buildings should follow this document. These considerations highlight the necessity of analyzing the prescriptions of ASCE 7-16 (regarding base isolation of buildings) and discussing its applicability to Colombia.

Keywords: Base (seismic) isolation, Colombia, ASCE 7-16

1 Introducción

El aislamiento sísmico (de base) de edificios, consiste en incorporar entre la fundación (subestructura) y la estructura principal (superestructura) una serie de dispositivos (aisladores) que son altamente flexibles en dirección horizontal, pero rígidos y resistentes en dirección vertical [1]. La finalidad es desacoplar parcialmente la estructura del suelo para controlar así la demanda sísmica en términos de fuerza transmitida por el terreno y, por ende, reducir el daño en la estructura. Este efecto se logra principalmente a través del gran alargamiento que se genera en el período fundamental del edificio; además, dado que la mayor parte de deformaciones se concentran en la capa de aislamiento, es posible añadir amortiguamiento adicional para reducir aún más las fuerzas sísmicas. La Fig. 1 describe un edificio con aislamiento de base.

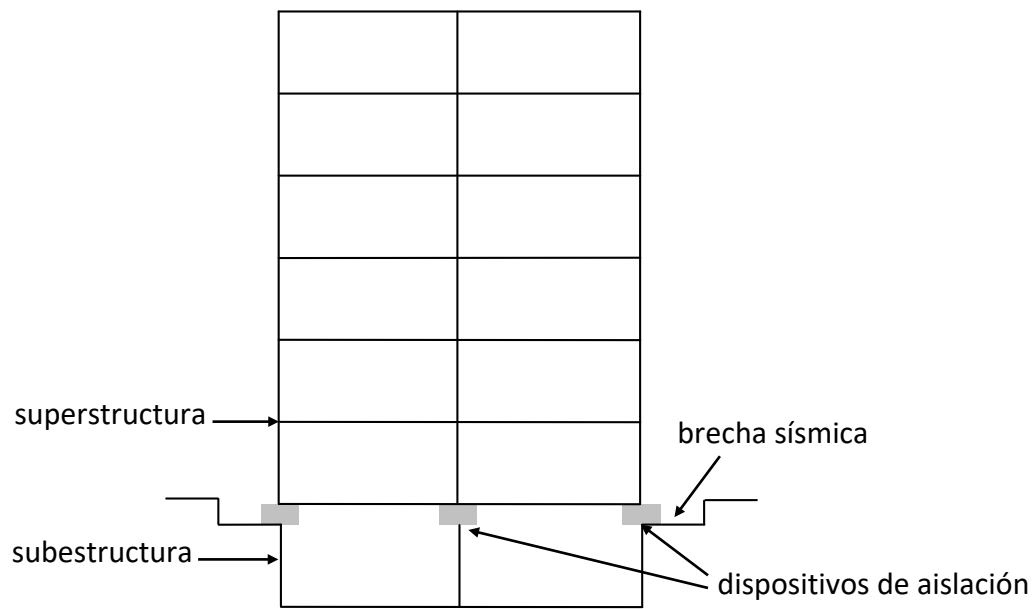


Fig. 1. Edificio con aislamiento sísmico

La Fig. 1 muestra que los aisladores se disponen a nivel del terreno y que debe dejarse un espacio alrededor del edificio para permitir los movimientos relativos respecto de la fundación; su anchura se conoce como brecha sísmica ("seismic gap" en lengua inglesa).

El comportamiento de edificaciones con aislamiento de base se ha reportado como satisfactorio cuando éstas se han visto expuestas a sismos severos. Así, en países como Chile [2], Japón [3], China [4] y USA [5], entre otros, se han constatado evidencias científicas de este comportamiento.

En Colombia, desde el año 2011 hasta el día de 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 este tipo de edificaciones, éstas debieron diseñarse siguiendo los lineamientos de documentos americanos como FEMA 450 [7] o ASCE 7-10 [8]; éstos además de estar vigentes en dicho momento, son los que sugiere seguir el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes (NSR-10) [9].

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

2 Comparación entre las prescripciones de ASCE 7-10 y ASCE 7-16 para edificios aislados

2.1 Consideraciones generales

Para 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. Dentro de dichos documentos, en el capítulo 17 (Aislamiento sísmico de edificaciones) se presentan importantes cambios técnicos [11], de los cuales a continuación se analizan los que, a criterio de los autores del presente artículo, podrían generar más controversia en su futura aplicación en Colombia. Además de la citada comparación, se analiza la procedencia de los importantes cambios generados y se explica el porqué de estos; estando todo esto expuesto de acuerdo con el criterio de los autores del presente trabajo.

2.2 Componentes en, sobre o que atraviesen la interfaz de aislamiento

En ASCE 7-16 se indica que la respuesta dinámica de este tipo de elementos (tanto estructurales como no estructurales) debe ser determinada rigurosamente y se debe garantizar, en los elementos que lo requieran, que las deformaciones permanentes a largo plazo no afecten a su funcionamiento. En ASCE 7-10 no se especificaba la necesidad de acomodar los elementos que lo requieran a las deformaciones permanentes que puedan presentarse.

Los elementos que se pueden ver afectados por esta prescripción son los suministros (agua, gas, electricidad, internet, telefonía, etc.), evacuaciones (aguas negras y pluviales, básicamente) y el sistema de bloqueo provisional para las fuerzas del viento. En cuanto a los elementos de comunicación vertical que pueden atravesar la capa de aislamiento, sólo las escaleras manuales deben hacerlo, ya que los ascensores y las escaleras mecánicas no son capaces de absorber sin daño los grandes desplazamientos que se generan en ésta.

2.3 Desempeño sísmico esperado

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. En dicha Tabla se evidencia que, para sismos moderados y severos (fuertes), las edificaciones aisladas deben tener mejor nivel de desempeño que las de base fija.

Tabla 1 – Desempeño esperado en ASCE 7-16 para edificaciones con base fija y edificaciones con aislamiento de base

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

Fuente: Adaptado de [10]

El desempeño para base fija mostrado en la Tabla 1 se refiere a edificaciones con grupo de uso IV, es decir, catalogadas como indispensable en el Reglamento NSR-10 [9]. Si lo indicado en la Tabla 1 se representa de una manera más ilustrativa se obtiene la comparación presentada en la Tabla 2.

Tabla 2 – Desempeño esperado en ASCE 7-16 para edificaciones con base fija con grupo de uso IV y edificaciones con aislamiento de base

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

Edificación con base fija (línea con flecha desde el punto de Moderado** a Fuerte***)

Edificación aislada (línea con flecha desde el punto de Fuerte*** a Operacional (FO))

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 muestran que, según la normativa americana, el nivel de desempeño esperado en edificaciones con base fija depende del tipo de sismo considerado y del uso de la edificación a diseñar, mientras que para edificaciones con aislamiento de base todo tipo de edificación debe tener como mínimo un nivel de desempeño operacional (FO) para el sismo fuerte; en la Tabla 2 se interpreta que para sismos inferiores el desempeño en edificaciones aisladas sería mayor, lo cual se indica mediante la línea mostrada con la flecha de tendencia.

2.4 Periodo de retorno del sismo de diseño para 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. Es destacable que 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 evidencia en la Tabla 2, se espera que el desempeño para edificaciones con aislamiento de base (con cualquier uso) sea mejor al obtenido en edificaciones indispensables con base fija; se debería entonces emplear el mismo sismo de diseño en ambos casos (edificaciones aisladas y edificaciones con base fija) para evidenciar tal objetivo.

La Tabla 3 describe el desempeño de edificaciones con base fija con grupos de uso I y IV.

Tabla 3 – Desempeño esperado en ASCE 7-16 para edificaciones con base fija con grupos 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**		●	●	
Fuerte***			●	●

Fuente: Adaptado de [9,10,12]

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

Examinando el desempeño (de edificaciones con base fija) mostrado en la Tabla 3, se observa que éste depende del sismo de diseño y del grupo de uso de la edificación. Si el nivel de desempeño se fija en seguridad a la vida (tal como se estipula en la normativa internacional), para una edificación con 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, multiplicando 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 lo 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, debe hacerse bajo la premisa de obtener un mejor desempeño que una edificación 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, obedecía 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 ambas versiones son incompatibles; en consecuencia, no es coherente pensar en una futura norma colombiana que adapte partes de las dos versiones de ASCE 7.

2.5 Grado de disipación de energía requerido

ASCE 7 considera que una estructura aislada debe tener el mismo nivel de disipación de energía (este concepto equivale a la clasificación de estructuras en ordinarias, intermedias y especiales en la normativa americana) 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 (esto incluye las conexiones), como sistema de resistencia a fuerzas sísmicas en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta. No obstante, esto se permite sólo cuando se den ciertas condiciones: (a) altura de la edificación menor o igual a 48.4 m, (b) coeficiente de capacidad de disipación de energía (R) igual a 1, b) se debe afectar el desplazamiento total máximo (DTM) por un factor 1.2.

Lo anterior parece indicar la posibilidad de que, en un futuro, se puedan emplear niveles de disipación inferiores en estructuras aisladas con respecto a estructuras con base fija. Este criterio es coherente con el nivel de desempeño esperado en las primeras y puede incentivar la implementación del aislamiento.

2.6 Coeficiente de importancia

Siempre se considera que el coeficiente de importancia debe ser igual a 1, ya que independientemente del uso que tenga la edificación aislada, el desempeño esperado es el mismo. Ello equivale a considerar un único sismo de diseño.

2.7 Límites para las derivas

El límite de deriva para edificaciones con aislamiento de base está definido como $0.015 h_{sx}$, siendo h_{sx} la altura de entrepiso. Este límite es más estricto que el usado en edificaciones con base fija por dos razones: (a) el sismo de diseño asociado a este límite tiene un periodo de retorno de 2475 años, (b) el desempeño esperado para cualquier estructura aislada debe ser el mismo (sin importar su uso).

Este límite de deriva, aunque es elevado, indica un nivel de desempeño mejor al de edificaciones con base fija, ya que con dicho valor se espera un desempeño cercano al de ocupación inmediata (IO) para el sismo máximo esperado (fuerte). Esto contradice lo presentado en la Tabla 1 y la Tabla 2, en el sentido que se indica un nivel de desempeño operacional (FO); no obstante, parece ser un poco más coherente con el nivel de exigencia que se le podría solicitar a este tipo de edificaciones.

2.8 Consideración de las irregularidades de los edificios

El tratamiento que se da a las irregularidades en ASCE 7-16 es diferente al estipulado en NSR-10 [9], de ahí que este aspecto se deba manejar con sumo cuidado.

En primer lugar, 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 penalización, bien sea en aspectos relacionados con la categoría de diseño sísmico permitida (relacionada con el nivel de disipación de energía) [10], o al uso de factores que modifican el coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas de diseño básico R_0 [9].

Para ASCE 7-16 la cantidad de irregularidades en edificaciones con aislamiento de base difiere de las consideradas en edificaciones con base fija, ya que en las primeras se espera un impacto menor en el comportamiento estructural de la edificación [13,14]; además, algunas irregularidades pueden suprimirse con una adecuada distribución de rigideces en el sistema de aislamiento.

Las irregularidades 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.

2.9 Factor de redundancia

La redundancia estructural está relacionada con el grado de hiperestaticidad estructural. En edificaciones con base fija, la ductilidad y la redundancia son los medios más efectivos para

proporcionar seguridad contra colapso y daños excesivos [15]; en consecuencia, las estructuras con base fija que carecen de redundancia estructural se penalizan con un incremento de las fuerzas sísmicas actuantes. En edificaciones con aislamiento de base no se aceptan ni daños excesivos ni colapso, por el contrario se espera un comportamiento muy cercano al elástico; por tanto, en la nueva versión de ASCE se indica que debe asignarse un factor de redundancia que incremente las fuerzas sísmicas únicamente en aquellas estructuras clasificadas como irregulares.

2.10 Metodologías de análisis y diseño estructural

Las estrategias de análisis y diseño estructural básicamente son las mismas empleadas en edificaciones con base fija: FHE (Fuerza Horizontal Equivalente, es decir, análisis estático equivalente tomando un solo modo), ADE (Análisis Dinámico Elástico Espectral, es decir, análisis estático equivalente tomando varios modos) y ADC (Análisis Dinámico Cronológico, es decir, análisis dinámico no lineal conocido habitualmente como “nonlinear time-history analysis” en lengua inglesa). Estas estrategias 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 (tipos E o F)	NP	NP	P
CONFIGURACION DE LA SUPERESTRUCTURA			
Superestructura flexible	NP	NP	P
Superestructura irregular	NP	NP	P
Superestructura con comportamiento no lineal	NP	NP	P
* $h > 4$ pisos, * $h > 19.8$ m, $T_M > 5$ s	NP	NP	P
$T_M \leq 3 T$	NP	P	P
SISTEMA DE AISLAMIENTO			
$\beta_M > 30\%$ (factor de amortiguamiento equivalente)	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 [9,10,12]

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

T : periodo fundamental (elástico) de la edificación con base fija; T_M : periodo fundamental de la edificación aislada para el desplazamiento máximo; h : altura del edificio; β_M : amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento al desplazamiento máximo; NP: No Permitido; P: Permitido

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

2.11 Distribución de fuerzas sísmicas por nivel

ASCE 7-10 y ASCE 7-16 consideran distintas distribuciones de fuerzas (no uniformes) para cada nivel; en ciertos casos, la distribución 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 generando posibles fuerzas de tensión en los aisladores.

La nueva expresión para la distribución de fuerzas sísmicas en cada nivel ha sido adaptada en ASCE 7-16 debido a los importantes resultados de investigaciones recientes [17]. Adicionalmente, 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.

2.12 Variación de las propiedades mecánicas de los dispositivos empleados

ASCE 7-10 menciona la importancia de incluir la variación de las propiedades mecánicas de los dispositivos, pero no define una metodología para incorporar dicha variable. Sin embargo, ASCE 7-16 incorpora una serie de factores (λ) para estimar las propiedades máximas y mínimas de los dispositivos (básicamente, la rigidez y el amortiguamiento) teniendo en cuenta parámetros como edad, condiciones ambientales, condiciones de fabricación, etc. Si se aplican estos criterios se obtiene un rango (entre el mínimo y el máximo) muy amplio; ello se debe a que los valores proporcionados deben abarcar a tipos muy distintos de dispositivos. Por dicha razón, ASCE 7-16 indica que, si se dispone de información más específica proporcionada por el fabricante, puede (y debe) utilizarse ésta.

2.13 Estimación de los desplazamientos de diseño

En ASCE 7-10 se estiman los desplazamientos de diseño (de los aisladores) considerando un periodo efectivo, calculado éste con las propiedades mínimas del sistema de aislamiento, y un amortiguamiento efectivo, correspondiente a las propiedades máximas; esto puede interpretarse como una medida conservadora y poco realista, proporcionando desplazamientos altos. Sin embargo, ASCE 7-16 calcula los desplazamientos de diseño para las propiedades mínimas y máximas, seleccionando el caso más crítico. Esto indica nuevamente que las dos versiones de ASCE no son compatibles, a pesar de que busquen el mismo objetivo.

2.14 Fuerzas y desplazamientos laterales mínimos

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 (medida conservadora). 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 (subestructura)			
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 (superestructura)			
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)

Fuente: Adaptado de [9,10,12]

V_b : fuerza horizontal (cortante) en la base para la capa de aislación y la subestructura; V_s : fuerza horizontal (cortante) en la base para la superestructura; D_{TD} : desplazamiento total para el sismo de diseño; D_{TM} : desplazamiento total para el sismo máximo

2.15 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 la sub-estructura:** 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 sólo 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 y además tiene en cuenta el 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 exhaustiva para tener en cuenta esta importante variable.
- **Cálculo de desplazamientos de diseño:** ASCE 7-16 presenta una metodología clara y coherente, donde 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:** ASCE 7-16 es más restrictivo en los límites para la metodología de análisis dinámico elástico espectral (ADE).

3 Conclusiones

En este artículo se comparan las metodologías para diseño de edificaciones con aislamiento de base de las dos versiones más recientes de ASCE 7 (2010 y 2016); se constata que hay una notable diferencia entre éstas. No obstante, a pesar de esta discrepancia, el nivel de desempeño esperado pretende ser el mismo. Por otra parte, es destacable que estos documentos están diseñados principalmente para edificaciones indispensables.

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

Finalmente, es importante destacar que no hay intercambiabilidad entre ASCE 7-10 y ASCE 7-16, por lo cual no se recomienda combinarlas para su aplicación en Colombia.

4 Agradecimientos

Este trabajo ha recibido ayuda del Gobierno español (Ministerio de Ciencia y Tecnología), proyectos BIA2014-60093-R y CGL2015-6591. La estancia de C. Piscal en Barcelona fue financiada por Colciencias, convocatoria 617. Estos apoyos son reconocidos con gratitud.

Referencias

- [1] N. Molineras Amaya, "Sistemas de control pasivos y activos de aislamiento de base para edificios sometidos a acciones sísmicas", *Rev. Científica Ing. Desarrollo.*, vol. 14, núm. 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, núm. 2&3, pp. 4–28, 2012.
- [3] Earthquake engineering research (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 (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, núm. 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, núm. 3, pp. 180–197, 2016.
- [16] F. Cheng, H. Jiang, y K. Lou, *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. USA: 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.