



Cambios Recientes en la Filosofía de Diseño de Edificaciones Aisladas de Acuerdo a ASCE 7. Aplicabilidad a Colombia

Recent Changes in Design Philosophy of Seismic Isolation Buildings According to ASCE 7. Applicability to Colombia

Carlos M Piscal A ⁽¹⁾, Francisco López A 2⁽²⁾

⁽¹⁾ Profesor Asociado, Programa de Ingeniería Civil, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.

⁽²⁾ Profesor, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Tecnología de la Arquitectura, Barcelona, España.

Dirección para correspondencia: cpiscal@unisalle.edu.co

TEMA B/ Sistemas de aislamiento y Disipación de Energía

Resumen

En Colombia el número de edificios que incorporan aislamiento de base como técnica de protección sismo resistente es aún escaso, a pesar de sus grandes ventajas; esta insuficiencia constituye una importante preocupación para los ingenieros civiles del país, habiéndose emprendido diversas iniciativas para promover esta tecnología. Debido a que Colombia actualmente no cuenta con una normativa propia para su diseño y construcción, los edificios aislados han seguido hasta el momento los requisitos de normas americanas como ASCE 7-10 o FEMA 450; éstos, además de estar vigentes en el momento del diseño de los edificios, son los que sugiere seguir el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). El documento ASCE 7-10 ha sido recientemente actualizado, incorporando los resultados de las investigaciones más recientes en el tema, resultando así un nuevo texto (ASCE 7-16) con importantes modificaciones. Por coherencia, las futuras edificaciones con aislamiento de base que sean diseñadas y construidas en Colombia deberían seguir dicho documento. En este artículo se analizan los recientes cambios entre las dos versiones más recientes de ASCE 7, las posibles incompatibilidades entre el capítulo 17 de ASCE 7-16 (dedicado al aislamiento de base) y NSR-10 y se discute su futura aplicabilidad en Colombia.

Palabras-clave: Aislamiento sísmico de base, Colombia, ASCE 7.

Abstract

In Colombia, the number of buildings with seismic isolation like a resistant earthquake protection technique is still scarce, despite its important advantages; this insufficiency is a major concern for civil engineers in the country, and several initiatives have been undertaken to promote this technology. Due Colombia does not currently have a local regulation for design and construction this kind of buildings, seismic isolated buildings have up to now followed the requirements of American regulations such as ASCE 7-10 o FEMA 450. These, in addition to being in force at the time of the design of the buildings, are those suggested by the Colombian Regulations (NSR-10). ASCE 7-10 has recently been updated, incorporating the most recent researches' results on the subject, generating a new document (ASCE 7-16) with notorious changes. For consistency, future seismic isolated buildings that will be designed and built in Colombia must follow these documents. This paper analyze the changes between both more recent version of ASCE, define the possible incompatibilities between Chapter 17 of ASCE 7-16 (dedicated to base isolation) and NSR-10 and discusses its future applicability in Colombia.

Keywords: Seismic base isolation, Colombia, ASCE 7.

1. Introducción

El aislamiento sísmico de base en edificios, consiste en incorporar entre el suelo de cimentación y la estructura principal una serie de dispositivos que son altamente flexibles en dirección horizontal, pero rígidos y resistentes en dirección vertical (aisladores) (Molinarés Amaya, 2011). 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 incremento en la flexibilidad y el amortiguamiento, brindado por el sistema de aislamiento a la estructura principal.

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 (Almazán, 2012), Japón (EERI, 2012), China (EERI, 2013) y USA (Nagarajaiah & Sun, 1996), entre otros, se han obtenido evidencias científicas de este comportamiento. En general, las estructuras sometidas a sismos severos que incorporan esta tecnología, han presentado respecto a las edificaciones con base fija: una reducción notable de las derivas de entrepiso, una reducción de las aceleraciones absolutas, daños mínimos o nulos en elementos estructurales y no estructurales, operatividad de la estructura durante y después del evento sísmico.

En Colombia, desde el año 2011 hasta el día de hoy, se han diseñado y construido aproximadamente 30 edificaciones que emplean esta tecnología de protección sísmica. Debido a que el país no cuenta con una normativa propia para el diseño de las mismas, éstas debieron diseñarse siguiendo los lineamientos de documentos americanos como FEMA 450 (FEMA,

2004) o ASCE 7-10 (ASCE 7-10, 2010); éstos además de estar vigentes en dicho momento, son los que sugiere seguir el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes (NSR-10) (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).

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 (ASCE 7-10, 2010; ASCE 7-16, 2016), 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 (Mayes, 2014; Piscal Arevalo & Lopez Almansa, 2019), 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 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 fuertes, las edificaciones aisladas deben tener mejor nivel de desempeño que las de base fija. 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 (ASCE 7-10, 2010).

La Tabla 1 muestra 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.

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

2.3 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 1, 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.

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 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 (ASCE 7-16, 2016)). 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.

2.4 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, (c) 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.

2.5 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.

2.6 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 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde 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.

2.7 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, 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) (ASCE 7-16, 2016), o al uso de factores que modifican el coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas de diseño básico R_0 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).

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 (De Stefano & Pintucchi, 2008; I. Doudoumis, 2005); 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.

2.8 Factor de redundancia

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.

2.9 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 (Ryan & York, 2007). Adicionalmente, dicha metodología resuelve el problema que se presentaba en la anterior expresión cuando se tenían entrepisos con peso considerable ubicados a una distancia muy corta del sistema de aislamiento.

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), ADE (Análisis Dinámico Elástico Espectral) y ADC (Análisis Dinámico Cronológico). Estas estrategias se pueden aplicar siguiendo las recomendaciones de la **Tabla 2**.

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. Se vislumbra que en el futuro el método ADE tienda a eliminarse y se extienda el uso de ADC.

Tabla 2. 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

(*) 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

2.11 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.

2.12 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.

2.13 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. Un resumen de estos requisitos se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. 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)			
	Método de análisis	ASCE 7-10	ASCE 7-16
Fuerza mínima	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)

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

2.14 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. Referencias

Almazán, J. (2012). **"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, 7(2&3), 4–28.

ASCE 7-10. (2010). **"American Society of Civil Engineers Minimum design loads for buildings and other structures"**. ASCE standard 7–10.

ASCE 7-16. (2016). American Society of Civil Engineers Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. **"ASCE standard 7–16"**.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). **"Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10"**.

De Stefano, M., & Pintucchi, B. (2008). **"A review of research on seismic behaviour of irregular building structures since 2002"**. Bulletin of Earthquake Engineering, 6(2), 285–308.

EERI. (2012). **"Performance of Engineered Structures in the Mw 9.0 Tohoku, Japan, Earthquake of March 11, 2011 (Learning from Earthquakes)"**. Special Earthquake Report.

EERI. (2013). **"The Mw 6.6 Earthquake of April 20, 2013 in Lushan, China (Learning from Earthquakes No. Special Earthquake Report)"**. Special Earthquake Report.

FEMA. (2004). **"NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450)"** Provisions/Prepared by the Building Seismic Safety Council. Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences.

I. Doudoumis. (2005). **"Effects of vertical irregularities on the seismic behavior of multi-story buildings with base isolation"**. Presentado en 4th European workshop on irregular and complex structures.

Mayes, R. (2014). **"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.

Molinares Amaya, N. (2011). **"Sistemas de control pasivos y activos de aislamiento de base para edificios sometidos a acciones sísmicas"**. Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, 14(14), 60–92.

Nagarajaiah, S., & Sun, X. (1996). **"Seismic performance of base isolated buildings in the 1994 Northridge earthquake"**. En Proc. 11th WCEE. Paper. 11 World Conference on Earthquake Engineering.

Piscal Arevalo, C. M., & Lopez Almansa, F. (2019). **"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"**. Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, 37(1), 57–70.

Ryan, K. L., & York, K. (2007). **"Vertical Distribution of Seismic Forces for Simplified Design of Base-Isolated Buildings"**. En New Horizons and Better Practices (pp. 1–10). American Society of Civil Engineers.