

# COMENTARIOS AL ESTÁNDAR PARA AISLAMIENTO SÍSMICO

## Alcance, Objetivos, y Justificación de las Provisiones del Estándar

El objetivo prioritario de este estándar es reducir el riesgo de colapso de estructuras aisladas, y de ese modo salvar las vidas de las personas dentro y sobre esas estructuras. El objetivo secundario de este estándar es minimizar el daño sísmico de tal manera que las facilidades puedan mantener la funcionalidad después de los eventos sísmicos. Estos objetivos también incluyen la reducción de pérdidas económicas devastadoras que los terremotos causan con frecuencia en estructuras de propietarios, negocios, familias, y comunidades enteras.

Primero, este estándar especifica requisitos mínimos con los que los aisladores deben ser diseñados y manufacturados, para limitar el riesgo de colapso a menos de un 1% de probabilidad en 50 años. Segundo, este estándar especifica requisitos de desempeño mínimo que las estructuras con aislamiento deben ser diseñadas para reducir los riesgos de daño por movimientos sísmicos hasta niveles especificados. El aislamiento sísmico es de amplio uso, y se ha vendido al público como un medio de minimizar daños por terremotos. La adopción de este estándar para aisladores por los códigos de diseño de estructuras se necesita urgentemente.

Los estándares ASTM, hasta 2016, no incluyen ningún estándar para los materiales y la fabricación de aisladores sísmicos, ningún estándar sobre las capacidades de carga de los aisladores, las capacidades de desplazamiento, los factores de seguridad, las variaciones de propiedades, los efectos de envejecimiento, los efectos de temperatura, la longevidad de los materiales, la fabricación o los métodos de prueba.

El estándar ASCE 7 y la Guía de Especificaciones de AASHTO, hasta 2016:

- No referencian ningún estándar publicado para los materiales, manufactura o procedimientos de prueba de aisladores.
- No especifican factores de seguridad para las capacidades resistentes del aislador.
- No requieren que las estructuras aisladas tengan un menor nivel de riesgo al compararlas con estructuras no aisladas.
- No requieren que las estructuras aisladas tengan menos daño sísmico al compararlas con estructuras tradicionales no aisladas.

La falta de estándares en la industria ha resultado en estructuras aisladas que con frecuencia son las más seguras, y algunas veces las más peligrosas, de todas las estructuras que cumplen con los códigos que han sido construidas durante las décadas

recientes. La falta de estándares ha resultado en muchos abusos del concepto de aislamiento sísmico, implementado por individuos no calificados, con el objetivo de vender sus aisladores no calificados. Hace treinta años, unos pocos fabricantes de aisladores de alta calidad, producían aisladores de calidad diseñados para minimizar el daño por movimientos sísmicos. En 2016, hay más de 100 compañías que ofrecen “fabricar aisladores sísmicos”. Estos son típicamente vendidos como que satisfacen con los requisitos mínimos de los códigos de diseño de estructuras, pero son realizados sin estándares industriales, y se venden sin ingeniería para minimizar el daño por movimientos sísmicos. Los aisladores fabricados sin estándares son peligrosos, y están poniendo en riesgo las vidas de miles de personas. La adopción de estándares para todo componente estructural, y especialmente para aisladores y amortiguadores sísmicos, es un requisito fundamental de la disposición de seguridad pública ordenada por los códigos de diseño estructural.

Cuando se instalan aisladores de baja calidad en las estructuras, crean peligrosos mecanismos de colapso tipo “piso blando”. Desde los 1970s, los códigos para edificios se han esforzado por eliminar los peligrosos “pisos blandos”. ASCE 7 establece un intento por limitar el riesgo de colapso total o parcial a 10%, 10%, 6%, y 3% para las Categorías de Riesgo I, II, III, y IV, respectivamente (ASCE 7 Tabla C.1.3.1b). Los edificios aislados que cumplen mínimamente con los requisitos reglamentarios de ASCE 7, que utilizan aisladores fabricados de baja calidad, generan peligrosos pisos blandos. El riesgo de colapso para tales estructuras aisladas pueden exceder diez veces el máximo riesgo de colapso fijado por la ASCE 7 [Zayas et al, 2016].

El aislamiento sísmico ha sido implementado para minimizar el daño por movimientos sísmicos por más de \$100.000 millones en edificios importantes, puentes, y facilidades industriales [Zayas, 2013]. Por ejemplo, el Puente de Bahía en Ecuador, de 2 kilómetros de longitud une las ciudades costeras de San Vicente y Bahía de Caráquez, una línea de puente vital para vehículos de emergencia [Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Ecuador, 2010]. El puente experimentó una aceleración del suelo estimada en 0.9 g, incluido el efecto de un pulso violento direccionado, durante el terremoto de Ecuador M7.8 en 2016. La falla se rompió a 120 kilómetros en dirección hacia el Puente, con efectos de *directividad* que amplificaron las ondas sísmicas. La falla de rotura cruzó el Puente, y se rompió 60 kilómetros adicionales más allá del puente. El puente experimentó movimientos con intensidad del doble de fuerza comparado con el espectro de diseño original. Los aisladores tuvieron factores de seguridad acordes con este estándar, lo que impidió que los vanos del Puente tengan un colapso total. Los aisladores sísmicos que fueron diseñados con procedimientos que siguieron este estándar, mantuvieron completamente la funcionalidad de este Puente, durante y después del terremoto [Mosquera, 2016]. Este caso demuestra la necesidad y los beneficios de aisladores de calidad que tengan factores de seguridad adecuados. En contraste, el Viaducto Transeuropeo con aislamiento, en Turquía, sufrió casi el colapso total bajo movimientos del suelo mucho menores [Roussis et al, 2002], y necesitaron el cierre y apuntalamiento, y fue una pérdida económica del 100%. Este estándar provee para los aisladores, los estándares y los factores de seguridad que son necesarios para todos los componentes estructurales.

Las provisiones de este estándar tienen por intención que las nuevas estructuras aisladas construidas, sean diseñadas y construidas para ser seguras ante el colapso provocado por un terremoto con menos del 1% de probabilidad de ser excedido en 50 años, similar al terremoto de Ecuador de 2016. Este nivel de seguridad ante el colapso es esencialmente equivalente a lo que el Estado de California requiere para el diseño y construcción de nuevos hospitales. Este estándar requiere un nivel más alto de seguridad ante el colapso si se lo compara con los requisitos para cualquier estructura diseñada usando el estándar ASCE 7, que incluye hospitales y otras estructuras con riesgo Categoría IV. Este estándar requiere un nivel más alto de seguridad ante el colapso si se lo compara con los requisitos de estructura dúctil de AASHTO, para Puentes Críticos. Ya que las estructuras aisladas han sido vendidas al público como protección de las estructuras del daño de terremotos, este estándar establece una seguridad al colapso para estructuras aisladas que excede a la seguridad requerida por ASCE y AASHTO para estructuras no aisladas.

Para todas las estructuras aisladas, la seguridad estructural y el daño sísmico depende de los estándares propietarios, la calidad, y la integridad profesional del fabricante del aislador. Los aisladores son los componentes estructurales más críticos en una estructura aislada, y deben ser diseñados, fabricados y probados bajo estándares rigurosos.

Las fallas de aisladores, dentro de estructuras, han expuesto miles de componentes peligrosos de aislador, instalados en estructuras que “cumplen con los códigos”. Los componentes de aislador fabricados sin estándares adecuados, son la causa primaria de falla de esos aisladores. Una publicación de 2006, “Estructuras Aisladas Seguras e Inseguras - Safe and Unsafe Isolated Structures” de Zayas, Mahin, y Constantinou [Zayas et al], FEMA P695 reporta cálculos de la probabilidad de colapso de estructuras aisladas, con y sin estándares adecuados. Ejemplos de fallas dentro de estructuras incluyen:

- La Autopista Trans-Europea en Turquía tuvo la falla de más de 2000 componentes de sistemas de aislamiento, durante un terremoto, provocando un colapso casi total de un viaducto de 2.3 Km de longitud [Roussis et al, 2002]. Los componentes de los sistemas de aislamiento fueron de baja calidad, y en términos generales tuvieron capacidades de desplazamiento y propiedades insuficientes, comparadas con aquellas especificadas en el Reporte del Profesional en Diseño Estructural. Más de 2500 componentes de aislamiento sísmico fueron retirados y descartados. Los vanos del viaducto fueron apuntalados y reubicados mediante gateo, para que puedan ser sostenidos nuevamente por las pilas del puente. Los costos de reparación igualaron al costo total de la construcción original.
- La terminal principal del Aeropuerto de Kinming, en China, es un edificio aislado de 5 millones de pies cúbicos, con apoyos elastoméricos. Más de 600 de los aisladores instalados sufrieron delaminación entre el acero y el elastómero, bajo carga muerta. Ninguno de esos aisladores fue probado para control de calidad. Solamente los apoyos obviamente delaminados fueron reemplazados [McVitty and Constantinou, 2015].
- Durante el terremoto de Sendai – Japón, en 2011, un gran número de aisladores elastoméricos se delaminaron, ante un movimiento de la tierra relativamente moderado [Takahashi et al, 2012]. Hubo un gran escándalo cuando se descubrió que el fabricante de aisladores japonés había falsificado sus reportes de control de calidad.

- Los Edificios del Estado de California en Oakland, California, fueron provistos con dispositivos de amortiguamiento viscoso, de los cuales solamente el 25% fueron probados previo a la instalación. Los amortiguadores probados mostraron un comportamiento insatisfactorio, resultando en el retiro, re manufactura, y prueba de todos los amortiguadores. A pesar de que no se trataba de una estructura aislada sísmicamente, es uno de los ejemplos de la importancia de utilizar productos de alta calidad, de fabricantes reconocidos, y de la necesidad de las pruebas de control de calidad. También demuestra que se necesitan estándares adecuados para todos los productos de protección sísmica.

Sin estándares adecuados para materiales, manufactura y pruebas, los aisladores sísmicos tienen un alto riesgo de colapso, y fácilmente pueden provocar el colapso total de la estructura. Las estructuras construidas, que usan aisladores fabricados sin estándares adecuados, tienen sobre 10 veces más riesgo de colapso al compararlas con estructuras no aisladas [Zayas 2016]. De las observaciones dentro de estructuras, de la delaminación de apoyos elastoméricos, apenas bajo carga muerta, se ha estimado en promedio los “aisladores elastoméricos fabricados”, se delaminarán con desplazamientos laterales alrededor de la mitad de las demandas del sismo MCE (Maximum Considered Earthquake – Terremoto Máximo Considerado). Posiblemente las estructuras aisladas más peligrosas, hasta la fecha, han sido construidas siguiendo las provisiones del Euro código 8 y el EN15129. El Euro código 8 especifica un sismo base para el diseño, que resulta en capacidades de desplazamiento alrededor de la mitad de aquellos requeridos por la ASCE 7. Aún más, el EN15129 no especifica ningún factor de seguridad para tomar en consideración los eventos sísmicos más fuertes. Al contrario, el EN15129 en realidad prohíbe los anillos de restricción de seguridad, que previenen los desplazamientos excesivos del aislador. Los desplazamientos excesivos del aislador generalmente causan el colapso del aislador [Roussis], que fácilmente resultan en el colapso total de la estructura.

El concepto de aislamiento sísmico ha sido vendido a los profesionales de la industria de la construcción y al público como proteger sus instalaciones del daño del terremoto. Los propietarios esperan que las estructuras aisladas tengan un nivel de daño muy bajo, y cerca de cero riesgo de colapso. Muchos reportes de daño en estructuras aisladas, durante los eventos sísmicos muestran que la expectativa de mínimo daño con frecuencia no es satisfecha [Japan Property Central] [Kuang] [Roussis] [Takahashi]. Este estándar provee las disposiciones necesarias tal que las estructuras aisladas cumplan con la promesa de minimizar el daño por movimientos sísmicos [Imbsen] [Morgan] [Terzic] [Zayas].

Estos estándares para aisladores han sido desarrollados como un documento de consenso por parte de reconocidos expertos y autores contribuyentes que incluye, productores, diseñadores estructurales, y profesores que trabajan en el campo del aislamiento sísmico. El documento fuente original fue un estándar utilizado por uno de los fabricantes de aisladores, líder en el mundo, que priorizó la implementación de aisladores para reducir significativamente los daños sísmicos. Los estándares de los productos de construcción son típicamente tomados de los estándares propietarios de los productores líderes en la industria, de los mencionados componentes.

Los sistemas de aislamiento sísmico con frecuencia incluyen amortiguadores – disipadores de energía, separados de los aisladores. Este estándar no cubre a los amortiguadores. Los amortiguadores también deberían ser fabricados y provistos, de acuerdo con un estándar que debe ser desarrollado para amortiguadores, para que sean utilizados en construcción, para mejorar el desempeño sísmico de las estructuras. Un estándar equivalente para amortiguadores no existe, y es necesario.

## **Requisitos para la Calificación del Fabricante, Responsabilidades del Fabricante, Pruebas de Calificación del Aislador, y Calificación de las Facilidades del Fabricante para las Pruebas**

Se requiere para este estándar la Calificación de los fabricantes de aisladores, y sus estándares propios para sus aisladores. Los fabricantes deben demostrar que sus materiales y sus estándares de fabricación son suficientes para lograr estructuras seguras y confiables que satisfacen los estándares de desempeño de este documento. Para minimizar el daño sísmico y el riesgo de colapso, el requisito más esencial es que el aislador debe ser de alta calidad, y debe ser diseñado, especificado, y probado por los Ingenieros de Aislamiento Sísmico del fabricante, en la línea de producción del aislador. La calificación de un Fabricante de Aislador es similar a la calificación de un ingeniero profesional que tenga una licencia de especialidad, o a un doctor en medicina con una especialización certificada.

Bajo los códigos y estándares existentes, la gran mayoría de componentes estructurales son especificados como componentes genéricos. Estos componentes genéricos son fabricados utilizando materiales que son calificados a través de ASTM o pruebas similares. Estos componentes estructurales genéricos son manufacturados utilizando métodos de fabricación calificados a través de ASTM y otras pruebas estándar genéricas de la industria. Establecer estándares de producto es esencial para conseguir cualquier componente estructural mediante ofertas más bajas.

Este es un estándar para producto fabricado, que establece requisitos de desempeño y confiabilidad necesarios para lograr aisladores sísmicos seguros y confiables. Los mayores Fabricantes de aislador producen sus propios aisladores, que usan materiales y métodos de manufactura propios. La mayoría de los aisladores son producidos bajo patentes, y también emplean secretos comerciales en sus materiales y manufactura. Este sistema de producto es típico para todos los productos manufacturados tales como vehículos, aviones, computadores, elevadores, hornos, aires acondicionados, ventanas, aisladores, y amortiguadores sísmicos. Para desarrollar estándares ASTM para aisladores, que especifiquen materiales y métodos de fabricación, se requerirá al menos de 20 a 30 fabricantes produciendo los mismos aisladores, utilizando los mismos materiales y métodos de manufactura genéricos. Al momento, no hay dos fabricantes que produzcan los mismos aisladores genéricos, y un estándar genérico para aisladores está probablemente a 30 años de distancia.

De los 30 años de historia con aisladores sísmicos “manufacturados” y “fabricados”, hemos aprendido que: los fabricantes de aisladores de calidad han desarrollado materiales

y métodos de manufactura propietarios adecuados; y que los aisladores fabricados sin estándares adecuados son peligrosos. Los requisitos para pruebas y desempeño que se establecen en este documento establecen estándares mínimos para materiales, métodos de manufactura, factores de seguridad, y procedimientos para pruebas, que tratan de alcanzar una protección razonablemente confiable ante el daño y el colapso.

Las Pruebas de Calificación son las pruebas más importantes del aislador, requeridas por este estándar. Las Pruebas de Calificación en este documento son similares pero más detalladas que las “Pruebas de Caracterización del Sistema” requeridas por primera vez por AASHTO en 1991. Estas Pruebas de Calificación establecen que el fabricante debe tener la pericia especializada, y que la línea de producción del aislador del fabricante tiene la longevidad, robustez y confiabilidad adecuadas. Las Pruebas de Calificación establecen requerimientos a las propiedades y capacidades del aislador, conforme a aquellas asumidas en el diseño de la estructura. Las Pruebas de Calificación son específicas para el fabricante, y no para un proyecto específico.

Actualmente hay 6 principales fabricantes internacionales de aislamiento sísmico que han desarrollado materiales para aisladores y métodos de manufactura, de calidad. Estos fabricantes de calidad han implementado sus aisladores en muchas estructuras importantes. Como parte del proyecto específico de selección y aprobación, los fabricantes de alta calidad han demostrado calificaciones similares a las requeridas en este documento. Otros encargados de manufactura y fabricantes necesitarán desarrollar materiales y métodos de fabricación confiables, para calificar bajo los requerimientos de este estándar.

Pocas personas escogerían estar en un automóvil o avión, si conocieran que fue hecho sin estándares. La gente no debería estar en riesgo desconociendo que está en una estructura apoyada en aisladores hechos sin estándares.

## **Pruebas de Capacidad de los Aisladores y Factores de Seguridad Requeridos para el Aislador**

La necesidad de factores de seguridad en aisladores sísmicos ha sido propuesta por Nakazawa y Zayas en sus publicaciones referenciadas en este documento. Los criterios de aceptación de las Pruebas de Capacidad especificadas en el estándar, definen los factores de seguridad necesarios. Estas Pruebas de Capacidad son específicas para el fabricante y para un tipo específico de aislador, pero no son específicas para el proyecto.

Ya que con las estructuras aisladas que usan aisladores de alta calidad, se han reducido las incertidumbres respecto a los mecanismos de colapso, es generalmente apropiado un sistema total de colapso de baja incertidumbre caracterizado por un factor de dispersión  $\beta = 0.3$  correspondiente a una representación de fragilidad normal logarítmica, para estructuras aisladas de alta calidad, como se especifica en este documento. El comportamiento sísmico se simplifica cuando la alta calidad de los aisladores y los buenos principios de diseño evitan que la capacidad de desplazamiento de los aisladores sea excedida. Para lograr estructuras aisladas confiables, un factor de seguridad a la Resistencia a cortante, de 1.5, más un factor de seguridad de capacidad de desplazamiento

de 1.25, resulta en una proporción de reserva ante el colapso de 1.25 [Zayas, Mahin, Constantinou], y el riesgo de colapso calculado con FEMA P695 es 10% del sismo MCE. Las estructuras con Categorías de Riesgo III y IV requieren tener factores de seguridad a cortante de 2.3, lo que reduce el riesgo de colapso ante la ocurrencia del sismo MCE, a menos de 0.5. Un Cociente de Margen de Colapso de 1.5 para estructuras con aislamiento de calidad, cuando se implementan de acuerdo con los requerimientos de este estándar, también satisface los límites de riesgo de colapso a menos del 1% en 50 años, como se especifica en este estándar.

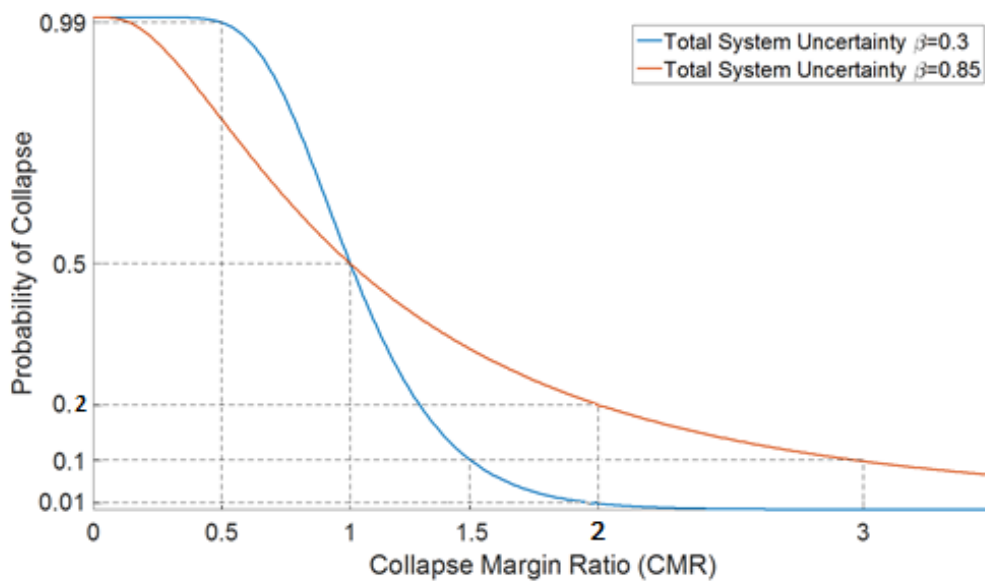
La capacidad requerida de Resistencia al cortante, en un aislador, para alcanzar un Cociente de Margen de Colapso de 1.5, depende de su rigidez lateral post  $D_{TM}$  [Zayas et al, 2016]. La prevención del colapso del aislador es alcanzada más efectivamente, proveyendo una combinación adicional de desplazamiento lateral y capacidad de cortante. La restricción rígida del desplazamiento más allá de  $D_{TM}$  causa una carga de impacto, y requiere una capacidad a cortante mayor. Tener rigideces laterales post  $D_{TM}$  muy bajas no es tan efectivo para reducir velocidades laterales post  $D_{TM}$ , y también requiere una mayor capacidad resistente a cortante.

Las incertidumbres de colapso total del Sistema son también bajas cuando se espera que colapsen los aisladores porque tienen solamente  $\frac{1}{2}$  de la demanda de desplazamiento requerida para el sismo MCE. Por ejemplo, los aisladores diseñados solamente para el sismo DBE (Design Basis Earthquake – Sismo Base de Diseño) típicamente tienen alrededor de  $\frac{1}{2}$  de la capacidad de desplazamiento requerida para el sismo MCE. Para los aisladores con solamente un medio de la capacidad de desplazamiento requerida por el sismo MCE, un valor de incertidumbre al colapso de  $\beta = 0.3$  también es aplicable, y la probabilidad de colapso calculada con FEMA P695 es del 99%. Las estructuras aisladas diseñadas y construidas con los requisitos mínimos del Euro código 8 y EN15129 que están en efecto en el 2016, son diseñadas para admitir solamente un terremoto nivel diseño, y se prohíben restricciones de seguridad al desplazamiento. De acuerdo con los cálculos de probabilidad de colapso de FEMA P695 [Zayas 2016], las estructuras aisladas diseñadas y construidas con el Euro código 8, que tienen solamente  $\frac{1}{2}$  de la capacidad de desplazamiento requerida para el sismo MCE, tendrán una probabilidad de colapso de 99% cuando ocurra un sismo MCE.

Las estructuras aisladas que tratan de evitar el colapso, pero usan aisladores fabricados de baja calidad, hechos sin estándares, tendrán una alta incertidumbre de evitar el colapso. Bajo la metodología de FEMA P695 se podría asumir que las estructuras de baja calidad están debajo de la línea del gráfico de  $\beta = 0.85$ . Tal baja calidad de las estructuras requiere un Cociente de Margen de Colapso de 3 para limitar el riesgo de colapso el 10% cuando ocurra el sismo MCE. Sin embargo, la baja calidad de los aisladores no seguirá la distribución estadística aleatoria para el riesgo de colapso, como se asume en FEMA P695, y resultaría en un riesgo de colapso más alto, comparado con estructuras no aisladas de baja calidad. Las probabilidades de colapso de estructuras aisladas, calculadas con FEMA P58, están en rangos de 0.01 a 0.99, dependiendo de la calidad del aislador y de la capacidad de desplazamiento. Los aisladores fabricados de calidad no probada tienen un riesgo de colapso muy alto, y están prohibidos bajo este estándar.

El cálculo de las máximas demandas de carga vertical en los aisladores, utilizando Procedimientos de Análisis de Respuesta en el Tiempo ha sido históricamente impreciso.

Los Procedimientos de Análisis basados en la Respuesta en el Tiempo fueron desarrollados para determinar las respuestas vibratorias laterales de las estructuras. Las frecuencias de respuesta lateral dominantes de las estructuras son frecuencias mucho más bajas que las frecuencias de respuesta dominantes verticales. Estos Procedimientos de Análisis de Respuesta en el Tiempo no tienen suficiente precisión en el dominio de las altas frecuencias para calcular con precisión las cargas verticales a partir de las vibraciones de frecuencia alta. Más aún, las vibraciones verticales de alta frecuencia no son de interés para la estabilidad de los aisladores. Los desplazamientos asociados con las vibraciones de alta frecuencia son demasiado pequeños para ser estructuralmente significativos. La duración de las cargas instantáneas de compresión o tensión vertical, que ocurren con las vibraciones de alta frecuencia, no son lo suficientemente largas para causar preocupación por la estabilidad. También, las pruebas de capacidad son realizadas bajo condiciones quasi-estáticas, mucho más exigentes que las vibraciones verticales de alta frecuencia. Por lo tanto, las cargas verticales en aisladores, que son aplicados para Pruebas de Capacidad y de Modelo, deben ser determinadas a partir del análisis estático, o mediante procedimientos de análisis estáticos equivalentes, pero no Análisis de Respuesta en el Tiempo.



**Probabilidad de colapso para incertidumbres totales del Sistema entre 0.3 y 0.85**

### **Pruebas de Control de Calidad del Aislador**

El desempeño sísmico de las estructuras sísmicamente aisladas, depende casi en su totalidad en la confiabilidad de los aisladores para entregar las propiedades asumidas en el diseño. Por consiguiente, las pruebas de control de calidad del 100% de los aisladores es la Segunda más importante prueba requerida por este estándar. Las Pruebas de Control de Calidad son específicas para cada proyecto. Las Pruebas de Control de Calidad son realizadas a las cargas de diseño, muerta más viva específicas del proyecto, y 2/3 de la demanda de desplazamiento del sismo MCE. Las Pruebas de Control de Calidad son las



mismas que las Pruebas de Control de Calidad especificadas por AASHTO, y las mismas que las “Pruebas de Producción” especificadas por ASCE 7.

## **Pruebas del Modelo de Aislador**

Las Pruebas del Modelo se realizan para medir las variaciones de propiedades para cada modelo diferente de aislador a cargas verticales y desplazamientos diferentes. Esto permite al ingeniero de diseño estructural, evaluar si las variaciones de las propiedades del aislador, a diferentes cargas verticales y desplazamientos son significativas para el diseño de la estructura. Una vez que se ha establecido la calidad del fabricante, a través de las Pruebas de Calificación, y las propiedades de diseño de todos los aisladores han sido verificadas con las pruebas de control de calidad al 100%, las variaciones de propiedades a diferentes niveles de carga y desplazamientos, se ha probado que son de poca significancia para la mayor parte de los diseños estructurales con aislamiento.

Los códigos de diseño de estructuras ASCE 7 y AASHTO especifican programas de “Prueba de Prototipos”. Estos programas especifican una secuencia de pruebas que fueron esencialmente desarrolladas en los 1980s, cuando el aislamiento sísmico era un concepto nuevo. Estos programas de “Pruebas de Prototipo” se desarrollaron para evaluar nuevos prototipos de nuevos tipos de aisladores sísmicos. El desarrollo de prototipos y pruebas debería ser un proceso interno del fabricante, y no un asunto de los códigos de construcción. Las Pruebas de Modelos definidas aquí, son especificadas para ser realizadas en aisladores representativos de la producción instalada. Las Pruebas de Modelo especificadas en este documento deben ser realizadas en aisladores representativos de la producción de aisladores instalada, luego de que el trabajo de desarrollo del prototipo esté completo. Es preferible si los aisladores para la Prueba de Modelo se seleccionan de la primera producción de un nuevo Modelo. Las Pruebas de Modelo son específicas para un modelo de aislador, y no para un proyecto específico. Este estándar, y ASCE 7, y AASHTO permiten que las Pruebas de Modelo se utilicen para un Proyecto, si el fabricante ha realizado Pruebas de Modelo de los mismos aisladores de una producción previa, esos aisladores tienen los mismos materiales, manufactura, materiales, capacidades y propiedades, que los aisladores a ser instalados. Para verificar las capacidades y propiedades del aislador, las Pruebas de Calificación y las Pruebas de Control de Calidad son más importantes que las Pruebas de Modelo.

## **Pruebas del Aislador Realizadas a Velocidades de Prueba Bajas o sobre Aisladores más Pequeños**

Al realizar el modelo del aislador y las pruebas de control de calidad en aisladores de tamaño natural, provee un alto nivel de certeza con relación a las capacidades y propiedades del aislador. Los factores de seguridad mínimos del aislador, especificados en este estándar, fueron desarrollados a partir del estudio de desempeño de aisladores a escala natural, probados dinámicamente. Las pruebas Quasi-estáticas son típicamente adecuadas para probar la Resistencia de un aislador a escala natural, pero generalmente representan mal la habilidad de un aislador para disipar la energía del terremoto, dentro de los tiempos realistas de duración de un terremoto. Desafortunadamente, no existen facilidades de prueba disponibles para aisladores sísmicos, que puedan probar

dinámicamente los aisladores más grandes que se están instalando en estructuras a mar abierto, grandes puentes, y edificios altos. Por tanto, este estándar permite que los aisladores sean probados lentamente, e inclusive con modelos de escala reducida, cuando se incluyen los ajustes apropiados en el diseño de la estructura aislada.

Basados en datos de prueba pasados, el límite de amortiguamiento del aislador de  $B_M = 1.0$  es adecuado para tomar en cuenta aisladores que son probados a velocidades menores que aquellas representativas de las cargas sísmicas reales. De manera similar, el límite de  $2/3$  de la capacidad de aislador de tamaño natural, al escalar resultados de las capacidades medidas en aisladores más pequeños, es adecuado tomar en cuenta las capacidades de aislador basadas en probar hasta la falla aisladores más pequeños. Ambos límites asumen que el fabricante ha sido totalmente calificado, basado en las pruebas dinámicas de aisladores de producción más pequeños.

## **Diseño Sísmico Elástico de la Estructura y Requisitos de Construcción para Edificios, Puentes, y Otras Estructuras**

Las provisiones para diseño sísmico de la estructura, en ASCE 7 y AASHTO, para estructuras no aisladas están basadas en alcanzar estructuras dúctiles. Las estructuras dúctiles se alcanzan siguiendo los estándares especificados para sistemas estructurales dúctiles especificados, miembros, materiales y métodos de fabricación. El factor de reducción de la carga sísmica,  $R$ , que se permite, está basado en la extensión de la ductilidad, que se alcanza de acuerdo con el detallamiento inelástico del miembro, con los materiales y la fabricación. Utilizar factores  $R$  y diseño dúctil de la estructura, es un método de diseño que intencionalmente permite daño, aceptando que daño significa que algunas estructuras colapsen, con la intención de los códigos de limitar los colapsos a menos del 10%.

El comportamiento de la estructura y las deformaciones, que ocurren en una estructura dúctil inelástica son muy diferentes de aquellos que ocurren en una estructura elástica. Lamentablemente, se asume un diseño elástico de la estructura en esencialmente todos los diseños implementados bajo ASCE 7 y AASHTO. La incompatibilidad entre las asunciones hechas en el diseño, y la respuesta altamente inelástica de la estructura durante sismos severos, es la causa primaria del colapso de estructuras. Diseños elásticos de la estructura son un orden de magnitud más confiable para evitar el colapso, comparado con los diseños de estructura que utilizan factores  $R$ . Por lo tanto, el diseño elástico de estructuras evita daño en la estructura, y vuelve al diseño y desempeño de la estructura más confiable.

Las provisiones en este estándar para estructuras aisladas están basadas en el requisito de que las estructuras sean diseñadas elásticamente. Este estándar especifica  $R = 1$  para que sea usado en el diseño sísmico de la estructura. Como tal, los factores de seguridad de los miembros individuales, asociados con los factores de capacidad resultan en que cada miembro tenga una reserva de resistencia y de capacidad de desplazamiento en el rango elástico, y aún más reserva de resistencia en el rango inelástico de respuesta. El miembro estructural típico se mantendrá “esencialmente elástico” para demandas de carga sísmica que son el doble de la demanda de cargas de diseño, alcanzando una respuesta estructural “confiablemente elástica”. Además, la “capacidad última” de los miembros estructurales

es típicamente tres veces la capacidad factorada “permisible”, alcanzando un factor de seguridad adicional contra el colapso, comparable a los factores de seguridad para viento o cargas de servicio. Aún más, los múltiples ciclos de carga inelástica reversible se eliminan, lo que es un factor clave en los detalles de ductilidad requeridos para miembros estructurales dúctiles

Por lo tanto, las provisiones para alcanzar miembros estructurales dúctiles, como se especifica en ASCE 7, AASHTO y los estándares subyacentes, no se producen necesariamente cuando el diseño y construcción de la estructura sigue estas provisiones. Las estructuras diseñadas de acuerdo con este estándar alcanzarán una confiabilidad mayor en el desempeño estructural, y confiabilidad contra el colapso de la estructura, comparado con los tipos de estructuras dúctiles tradicionales. Por consiguiente, cuando las estructuras son diseñadas y construidas de acuerdo con este estándar, entonces los estándares subyacentes para miembros dúctiles no son necesarios. Cualquier tipo de estructura y detalles aprobados por ASCE 7 o AASHTO, para resistir cargas de viento son suficientes para estructuras aisladas diseñadas de acuerdo con las provisiones de este documento, y por consiguiente son permitidos por este estándar.

Además de evitar confiablemente el colapso de la estructura, este estándar incluye provisiones para mantener la funcionalidad post-terremoto de las estructuras aisladas. Estas provisiones son consistentes con los *Criterios de Diseño del Aislamiento Sísmico para Desempeño de Funcionalidad Continua (Seismic Isolation Design Criteria for Continued Functionality Performance)*, de 2013, referenciado en este documento [Zayas]. Para edificios, esos criterios requieren limitar la deriva de piso y las aceleraciones de piso para reducir el daño en componentes arquitectónicos, y contenidos de los edificios. Para puentes, los criterios de *Funcionalidad Continua* requieren que las juntas de dilatación tengan suficiente capacidad de desplazamiento para acomodar los movimientos sísmicos y térmicos. Para ambos, edificios y puentes, los criterios de *Funcionalidad Continua* requieren que las líneas de servicios básicos y las conexiones que Cruzan los sitios de movimientos por aislamiento sísmico, tengan suficientes capacidades de desplazamiento para acomodar los desplazamientos sísmicos y térmicos.

## **Responsabilidades del Profesional Diseñador de la Estructura**

Los objetivos de minimizar los riesgos de colapso y el daño sísmico requiere al Profesional de Diseño Estructural que satisfaga esos objetivos de desempeño en el diseño estructural y la construcción, y los detalles no estructurales, afectados por el movimiento sísmico del aislador. El Profesional de Diseño Estructural, el Ingeniero de Aislamiento Sísmico, y el Fabricante, dependen uno de los otros, para alcanzar estructuras aisladas seguras, que minimicen el daño por movimientos sísmicos. Los profesionales de diseño de la estructura y del aislador, y el fabricante de aisladores, conforman una sociedad colaborativa para entregar facilidades que sufran un mínimo daño por los movimientos sísmicos, para beneficiar a los dueños de la facilidad y a sus ocupantes. Sin la participación experta de todos los tres involucrados, el aislamiento sísmico es con frecuencia muy peligroso.

## Referencias

- Ecuador Army Corps of Engineers, 2010. Datos recolectados de los documentos de diseño del Puente Los Caras.
- FEMA P695 (2009), *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- FEMA P795 (2011), *Quantification of Building Seismic Performance Factors: Component Equivalency Methodology*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- FEMA P751 (2012), *NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- FEMA P-58, (2012), *Seismic Performance Assessments of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- Imbsen, Zayas, Mokha, Low, *Seismic Design for Resilient and Sustainable Bridges*, 7th National Seismic Conference on Bridges, Transportation Research Board, 2013.
- Japan Property Central (2012), *30% of Apartments with Base Isolation Systems Suffered Damage in Earthquake*, JapanPropertyCentral.com, Enero 30, 2012.
- Kuang et al, *Christchurch Women's Hospital: Performance Analysis of the Base Isolated System During the Series of Canterbury Earthquakes 2011-2012*, Report CF1297, University of Canterbury, Department of Mechanical Engineering, Christchurch, New Zealand.
- McVitty, W.J. and Constantinou, M.C. (2015). Property Modification Factors for Seismic Isolators: Design Guidance for Buildings. Report MCEER-15-20005, NCEER, University at Buffalo, Buffalo, NY 14260.
- Morgan, Mahin, "The Use of Base Isolation Systems to Achieve Complex Seismic Performance Objectives", PEER 2011/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2011.
- Mosquera, General Pedro, Comandante del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Ecuador.
- Nakazawa T., Kishiki S., Qu Z., Miyoshi A., Wada A. (2011). *Fundamental Study on Probabilistic Evaluation of the Ultimate State of Base Isolated Structures*, Proceedings, 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.
- Nakazawa T., Kishiki, Qu Z., Wada A. (2012). *Safety margin ratio-based design of isolation gap size for base-isolated structures*, Proceedings, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- Roussis P.E., Constantinou M.C., Erdik M., Durukal E., Dicleli M. (2008). *Assessment of performance of Bolu Viaduct in the 1999 Duzce earthquake in Turkey*, Technical Report MCEER 02-0001, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering, State University of New York, Buffalo, NY.
- Takahashi Y. (2012) *Damage of rubber bearing and dampers of bridges in the 2011 great East Japan earthquake*, Proceedings, International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo Japan.
- Terzic, Merrifield, Mahin, "Lifecycle Cost Comparisons of Different Structural Systems", Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2012.
- Zayas, Mahin, and Constantinou (2016). *Safe and Unsafe Isolated Structures*, PEER Report No. 2016-01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, USA.
- Zayas V.A. (2013). *Seismic Isolation Design Criteria for Continued Functionality Performance*, Proceedings SEAOC 2013 Annual Convention, San Diego, CA.

Zayas, “Seismic Design for a Resilient and Sustainable Society”, 8CUEE, Tokyo Institute of Technology, 2011.

Zayas, Mahin, “Seismic Design Methodology to Avoid Damage to Structures, Non-Structural Components and Contents”, 13<sup>th</sup> US-Japan Workshop, Applied Technology, Council, 2010.

## **Reconocimientos**

Los autores primarios de este estándar son Victor Zayas y Michael Constantinou. Autores contribuyentes incluyen a Stephen Mahin, Anoop Mokha, Stanley Low, Fayad Rahman, Pedro Mosquera, Mauricio Espín, Marcelo Romo, y Enrique Morales. Los estándares de este documento son una colección y evolución de los estándares para la fabricación de aisladores, pruebas, e ingeniería, como fueron desarrollados e implementados por Earthquake Protection Systems, Vallejo, California. Estos estándares representan las mejores prácticas en aislamiento sísmico, como se desarrollaron a través de 37 años de investigación y desarrollo de aisladores sísmicos; ingeniería, y aplicaciones para minimizar el daño por movimientos sísmicos para facilidades importantes. La traducción al español, y las implementaciones en estructuras aisladas en Ecuador, fueron realizadas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Ecuador.