

METODOLOGÍA DE REVISIÓN PARA EL SUPERVISOR TÉCNICO DE PROYECTOS CON DISIPADORES O AISLADORES SÍSMICOS

PEER REVIEWER GUIDELINES FOR A STRUCTURE WITH SUPPLEMENTAL DAMPING AND SEISMIC ISOLATION

ZULMA S. PARDO V.¹; Oscar Galindo²

¹Gerente ZJ Ingenieros Estructurales SAS; ²Estudiante PhD, Concordia University

zspardo@hotmail.com , osc.galindo@gmail.com

Resumen

Se presenta por primera vez en Colombia, una metodología para la revisión de proyectos con disipadores o aisladores sísmicos. A partir de la experiencia, manuales y otras referencias se identifican los aspectos más importantes a verificar para este tipo de proyectos y se ilustran en un diagrama de flujo para la utilización del revisor. Cada paso lógico es descrito con nivel de detalle suficiente y en virtud de cada tipo de disipador o aislador usado.

Palabras claves: Aislamiento, Disipación, Estructuras sísmicas, rehabilitación sísmica, Supervisión Técnica, Interventoría, criterios de aceptación o rechazo, Ingeniería Sísmica, Construcción, Diseño sísmico.

Abstract

Peer reviewer guidelines for structures with supplemental damping and seismic isolation is presented for the first time in Colombia. A compendium of steps based out of experience and commentaries from referenced standards and technical reports is used. The logical steps are then summarized in a flow process to illustrate peer reviewer's focused tasks. Each step is described in detail according to the category of damping devices or isolators to be used.

Key words: isolation, dissipation, seismic structures, seismic retrofit, technical supervision, Earthquake engineering, construction, seismic design, criteria of acceptance, rejection criteria.

1 ANTECEDENTES

Durante los últimos años, la implementación de sistemas de amortiguamiento suplementario y aislación sísmica para estructuras en Colombia ha crecido considerablemente. Se espera que, en el futuro cercano, el comité AIS 700 correspondiente a disipación y aislamiento sísmico de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica desarrolle la primera especificación de requerimientos mínimos sobre este tema para edificaciones en Colombia. Los autores de este artículo han identificado la

carencia de documentos de fácil acceso y en nuestro idioma, para que los futuros ingenieros que vayan a hacer uso de esos sistemas realicen adecuadamente la supervisión técnica de este tipo de proyectos. De igual forma, al estar estas normas compuestas por requerimientos mínimos, su implementación práctica puede no cumplir con la seguridad estructural esperada, puesto que la intervención de variables de riesgo aún no tiene el mismo nivel de documentación que para estructuras convencionales. En este documento, los autores presentan a través de diagramas de flujo sencillos cómo puede el revisor estructural

enfrentar la supervisión técnica de estos proyectos adecuadamente. Este documento constituye la primera versión para guiar a los ingenieros colombianos de forma eficiente y eficaz por todo el contenido de un proyecto con disipadores sísmicos o aisladores sísmicos en búsqueda de una verdadera resiliencia.

En Colombia, en 2006, se hizo la primera implementación de un sistema de disipación de energía, en el Hospital el Tunal, en Bogotá, y en el 2011, se implementaron técnicas de aislamiento sísmico en la Clínica Amiga, en Cali. En el mundo, estas tecnologías existen desde la década de los setenta, y durante los últimos treinta años del siglo XX, diferentes países del mundo entre ellos Japón, Estados Unidos, Italia, Canadá, Suiza, Nueva Zelanda. Francia, realizaron encuentros académicos intercambiar experiencias y especificaciones se han desarrollado según el estado del arte en cada uno de esos países.

A partir de experiencias en revisión de proyectos, entrevistas con fabricantes y material reportado, los autores han tratado de recopilar los puntos más relevantes en la revisión y supervisión de este tipo de proyectos. Casos como el goteo de disipadores viscosos en el puente de la bahía de San Francisco, (SFGATE 2013) y otros puentes en California (KAD y Benzoni 2017), el numeroso inventario de edificaciones con disipadores viscosos en Japón y Taiwán sancionados por falsificación de ensayos (TJT 2018), el riesgo de colapso por limitada capacidad de deformación en dos importantes hospitales en Ecuador en las provincias de Manabí y Esmeraldas, (elteléfono 2018) y el caso de aisladores en puentes que fallaron antes de ser usados en Colombia (Pardo 2005), debido a la ausencia de pruebas de calidad a las unidades instaladas permiten aprender importantes lecciones sobre los aspectos mínimos a asegurar en la revisión de un proyecto, y de cómo los requerimientos mínimos de las normas pueden ser insuficientes para alcanzar la seguridad estructural si no se analiza caso por caso, todas las variables de riesgo posibles.

En el caso de Estados Unidos, después del sismo de Loma Prieta (1989), se comenzaron a proponer estándares de diseño para estructuras con disipación (WHITTHAKER, y otros s.f.), el grupo de trabajo de disipación de energía (EDWG) del subcomité de aislamiento sísmico de la asociación de ingenieros estructurales del norte de California (SEAONC), redactaron la primera especificación para disipación a ser incorporada por el UBC. En ese documento se aceptan el análisis espectral lineal y no lineal, al mismo tiempo que el cronológico y se exige que los dispositivos sean ensayados antes de su uso en la estructura. Se especifica que los dispositivos no pueden ser usados para soportar las cargas gravitacionales de la edificación. En 1997, se mejoran los estándares con los documentos, (NEHRP 1997), incrementando los métodos de análisis a 4. En el 2000, se introduce el método de la fuerza horizontal equivalente, (NEHRP 2001), la versión NEHRP de 2003, fue incorporada en (ASCE 7-05), llegando hoy al (ASCE 7-16) y el (ASCE 41-17) constituyendo presumiblemente los requerimientos mínimos para la preservar la vida de ocupantes en un edificio. Sin embargo, estos mínimos no necesariamente garantizan objetivos de resiliencia ante sismos. Consecuentemente, gobiernos que financian estos estándares lo reconocen oficialmente e instruyen a agencias del estado a ir más allá del mínimo del estándar para lograr resiliencia verdadera en las geografías donde se aplican (NIST 2017). En vista de esto, y aludiendo al interés de un propietario de inmueble de estar por encima del objetivo mínimo, de la prevención del colapso (CP) de la norma NSR vigente, cuando se decide a usar aislamiento sísmico o disipación de energía, prácticas específicas y otros resultados de estudios de centros de investigación serán usados como fuente de esta guía.

2 PROCEDIMIENTO

A continuación se presenta la metodología y al final un diagrama de flujo de resumen de la propuesta.

2.1 Identificación del mecanismo de modificación de la respuesta

El revisor debe identificar qué produce la modificación de la respuesta de la estructura, en el caso de aisladores sísmicos, debe esperar que la estructura se represente globalmente por un cuerpo simplificado de un Grado de Libertad (GL) con un periodo fundamental alargado. Esto asume que la superestructura se comporta como un bloque de masa no deformable relativamente con su base y que toda la deformación ocurre en lo que se denomina interfaz de aislación, que es el nivel o plano en el espacio donde se encuentran los aisladores entre el piso que se mueve con el suelo y la superestructura ahora aislada. En el caso de disipadores, la modificación de la respuesta debe esperarse en el aumento en el porcentaje de amortiguamiento crítico, puesto que en general y para fines prácticos el periodo fundamental varía o no, como una estructura sin amortiguamiento adicional. Si el revisor detecta valores de amortiguamiento muy altos, por ejemplo, por encima del 35% son usados en disipadores dependientes de la velocidad, deberá investigar más adelante la respuesta explícita de la estructura con análisis cronológicos no lineales.

2.2 Identificación del tipo de mecanismo

2.2.1 Aisladores sísmicos

El revisor debe identificar si son elastoméricos, deslizadores de fricción, o elastoméricos con núcleos dúctiles deformables para poder así inferir preliminarmente en qué medida los componentes del aislador son susceptibles a la velocidad como es el caso de los polímeros, o a la fatiga como es el caso de algunos polímeros y de materiales usados para los núcleos deformables como el plomo, pues esta caracterización le servirá posteriormente para corroborar la magnitud de la variación de las propiedades nominales de estos (rigidez efectiva lateral, fuerza de respuesta cortante, desplazamiento máximo, fuerza cortante residual, deformación residual, capacidad de carga axial, rigidez axial etc.) y si esta fue incluida debidamente en el diseño.

2.2.2 Disipadores sísmicos

En este caso es más sencillo la clasificación del dispositivo puesto que los tipos empleados convencionalmente son dependientes del desplazamiento, de la velocidad o son sistemas híbridos o combinados entre estas dos, así el revisor deberá prestar atención a cómo el ingeniero asumió las características de los disipadores para su diseño estructural, puesto que los métodos de análisis separan el cálculo de las variables de acuerdo con esta clasificación. En la sección 2.6 de ensayos, el revisor debe comprobar o rechazar si esta hipótesis fue correcta.

2.3 Aceptación o rechazo del método de análisis usado

Para propósitos prácticos de lectura, el desplazamiento esperado y su fuerza de respuesta para el Sismo Máximo Probable y para el sismo de Diseño se identificarán como SMP (MCE, en inglés) y SD (DBE, en inglés) respectivamente. El revisor debe advertir que, para la evaluación de restricciones en la aceptación de un método u otro, sólo las propiedades nominales de un aislador o un disipador son tenidas en cuenta. Sin embargo, el análisis y el diseño deben usar las nominales y las de límite superior e inferior (ASCE 7-16). Definición y guía de estas se comentan en la sección 2.5. de este artículo.

2.3.1 Fuerza lateral equivalente (FLE)

2.3.1.1 Aisladores sísmicos

En el caso de aisladores, el proceso se describe bien en (ASCE 41-17) o en (ASCE 7-16). En estos documentos se advierte su aplicabilidad, el revisor debe tener en cuenta que este método no debe ser empleado si la estructura es irregular en altura o si presenta irregularidad torsional extrema o ambas. Lo anterior, se debe a que el método es calibrado a partir de modelos regulares de un GL y el comportamiento ante irregularidades es incierto. Adicionalmente, existe la restricción de altura a máximo 4 pisos o 20m, de la diferencia de por lo menos 3x entre el periodo asumido para la estructura aislada y la equivalente de base fija, y del

límite de 30% de amortiguamiento crítico para aquellos aisladores que usan núcleos dúctiles deformables, otras dos restricciones son de especial cuidado. La primera es que la superestructura debe comportarse elásticamente y aunque esto pareciera apenas lógico pues esta, es la hipótesis fundamental de la aislación de base, la última versión del (ASCE 41-17), introduce una definición flexibilizada de acuerdo con el objetivo de desempeño del proyecto dejando abierta la posibilidad que una superestructura pueda ser llevada incluso a la prevención del colapso (CP). La última versión del estándar (ASCE 7-16) ha retirado esta restricción, pero aclara en su comentario que la estructura debe permanecer elástica y con muy limitada demanda de ductilidad. Sin referencias bibliográficas en el estándar que respalden esta flexibilización, es común encontrar revisores con problemas para conciliar estos planteamientos contradictorios en cuanto a cómo la superestructura puede respetar el concepto de estructura aislada si presentase ductilidad similar a la de una estructura dúctil convencional cuando se le es presionado por la parte revisada en función de reducción de costos de construcción. Aquí el revisor debe usar su juicio de ingeniería y la literatura disponible para asegurar la pertinencia del método de análisis. Por ejemplo, estudios del Centro Multidisciplinario para la Investigación de la Ingeniería de Terremotos (MCEER 2018) encontraron con preocupación que si la superestructura es diseñada con un $R > 1$, la probabilidad de colapso de la estructura aislada puede ser inaceptable al punto de ser incluso mayor que una estructura dúctil no aislada. Así pues, en caso de que un factor de $R > 1$ sea propuesto, el revisor debe asegurarse de que la estructura cuenta con la ductilidad necesaria para (CP) y verificar esta propuesta a la luz de un análisis cronológico no lineal.

La segunda restricción a tener en cuenta es la rigidez efectiva mínima del aislador, su fuerza restitutiva y su capacidad de desplazamiento SMP. El (MCEER 2018) encontró, después de análisis detallados que, si el aislador no presenta un

aumento creciente de rigidez para los deslizadores de fricción al menos a 1.5x el desplazamiento SMP, o alguna restricción gradual del desplazamiento para elastoméricos luego de alcanzado este, junto con una capacidad de desplazamiento última de 1.9x para cualquier tipo, la probabilidad del colapso también puede ser inaceptable. Estas limitaciones deben ser advertidas al propietario del inmueble, quién debe tomar la última decisión sobre de sí un sistema con aislamiento cumple con sus expectativas de desempeño o prefiere un sistema convencional.

2.3.1.2 Disipadores sísmicos

En el caso de disipadores sísmicos, el método también está bien descrito en (ASCE 41-17) o en (ASCE 7-16), se aplican restricciones de irregularidad similares a las de aisladores y el amortiguamiento se limita a un máximo del 35%. La altura máxima es de 30m. El método no se puede usar si no se consideran al menos dos disipadores en cada dirección principal en cada piso y no existen diafragmas rígidos. Esta última garantiza, la aplicación de la teoría de equivalencias de matrices de rigideces y masas. En este punto, el revisor debe no sólo exigir el diafragma rígido en el análisis, verificar que éste exista, para la edificación analizada, haciendo que el diseño detallado conjunto de placa y vigas de entrepiso garantice esta hipótesis.

Es importante aclarar que, a pesar de ser un análisis estático, este método originalmente propuesto por el detallado trabajo de (Ramirez, et al. 2001) es una generalización de la respuesta del primer modo de una estructura con disipadores y con algún factor de inclusión de efectos de modos superiores. Por esta razón, no se recomienda usarlo si el ingeniero no tiene un amplio dominio de la teoría de análisis modal, debido a que la respuesta, en especial el vector modal, es obtenida a partir de un cálculo iterativo de una magnitud de energía y trabajo hecho por el desplazamiento y/o la velocidad. El revisor debe verificar detalladamente estos valores asumidos en la memoria de cálculo para asegurar que el valor de amortiguamiento propuesto no es exagerado. De la misma forma deberá cerciorarse

que los elementos que representan los disipadores capturan la rigidez efectiva del disipador real al punto de desplazamiento SD y SMP como corresponda. Esta revisión es más compleja para disipadores dependientes de la velocidad, puesto que la rigidez efectiva varía adicionalmente con la velocidad de entrepiso.

2.3.2 Análisis de respuesta espectral (RS)

2.3.2.1 Aisladores sísmicos

El método se describe superficialmente en (ASCE 7-16), las mismas restricciones y consideraciones para la aceptación del uso apropiado de FLE aplican para RS, con la advertencia adicional en cuanto a que la restricción acerca de la rigidez efectiva mínima del aislador, su fuerza restitutiva y su capacidad de desplazamiento SMP han sido peligrosamente omitidas. Sin mención en el comentario del estándar para respaldarse, el revisor debe evaluar adecuadamente si el aislador es capaz de mantener la rigidez a los desplazamientos requeridos. Alternativamente, puede guiarse en las recomendaciones de (MCEER 2018) expuestas en 2.3.1.1. para prevenir probabilidades inaceptables de colapso y entender en detalle estas restricciones.

2.3.2.2 Disipadores sísmicos

El método está bien detallado en (ASCE 7-16) y de manera general en (ASCE 41-17). Las mismas restricciones y consideraciones para la aceptación del uso apropiado de FLE aplican para RS con la diferencia que no hay restricción por irregularidades ni altura. Esto se describió en la sección 2.3.1.2

2.3.3 Análisis cronológico no lineal

Este tipo de análisis se describe en (ASCE 41-17) o en (ASCE 7-16), es equivalente al que se encuentra en la NSR vigente. Se recomienda cuando las estructuras son irregulares o cuando se quiere verificar explícitamente la respuesta de aisladores o disipadores en el análisis estructural puesto que no es posible en FLE y RS. El revisor debe verificar que el modelo constitutivo usado para los aisladores o disipadores corresponda a la literatura de soporte, o a la recomendación del

fabricante o ambas, y que este modelamiento sea a su vez verificado, o ajustado, luego de los ensayos de la sección 2.6 reincorporando dicha revisión al diseño estructural a través de los valores de $\lambda_{superior}$ y $\lambda_{inferior}$.

2.4 Aceptación o rechazo del objetivo de desempeño

En este momento el revisor del proyecto se encuentra en posición de identificar el desempeño sísmico que la estructura puede presentar de acuerdo con los resultados del análisis. Este dependerá principalmente de los valores obtenidos para la respuesta del sistema. En este punto se recomienda informar y solicitar al propietario aprobación de que el sistema satisface sus expectativas de desempeño, esperadas para la edificación, puesto que es posible que el propietario evalúe la posibilidad de usar una estructura sin aislación o sin disipación si el objetivo observado es similar al de una estructura dúctil convencional diseñada con el Título A de la NSR vigente.

2.4.1 Aisladores sísmicos

El desempeño global de la estructura dependerá principalmente de la deformación lateral máxima y permanente y de la aceleración de entrepiso medida en dos lugares cruciales: en cada piso de la superestructura y en la interfaz de aislación.

2.4.1.1 Superestructura

En el caso de los entrepisos de la superestructura, el valor de aceleración puede ser estimado por medio de métodos conocidos en el Título A de la NSR vigente aproximándose a partir de la extrapolación de la aceleración espectral y la aceleración del terreno para cada piso. Las deformaciones de entrepiso se determinan a partir del modelo matemático usado. Una vez estas son encontradas, pueden ser contrastadas con los límites para distintos grados de desempeño establecidos en los estándares, para elementos estructurales, no estructurales y de equipamiento como en (ASCE 41-17), (FEMA 2018) y otros. Por ejemplo, una superestructura aislada con derivas superiores al 0.5%h no representaría

Operacionalidad (O) del equipamiento y elementos no estructurales, y derivas superiores al 1%h y residuales superiores a 0.5% estarían por fuera de la Ocupación Inmediata (IO). Asimismo, (ASCE 41-17) establece que cuando la capacidad de un elemento es hasta $\frac{1}{2}$ la demanda de una acción de respuesta dúctil esto corresponde apenas a prevención del colapso (CP). Ejemplo: 2x capacidad de momento = momento de diseño.

2.4.1.2 Deformación residual permanente en los aisladores

El revisor debe prestar especial atención a la aceleración y deriva de la interfaz de aislación, puesto que todo el daño evitado en la superestructura se concentra en este plano en el espacio. El revisor debe verificar que la deformación permanente calculada para los aisladores represente el objetivo de desempeño deseado, algunos diseñadores asumen periodos muy largos para reducir esfuerzos en la superestructura sin contar que están aumentando proporcionalmente la deformación máxima de los aisladores y a su vez la deformación permanente de estos. Por ejemplo, aceleraciones de más de 0.4g o deformaciones máximas de 15mm alcanzarían los límites de capacidad de la mayoría de las guías de los ascensores y, deformaciones permanentes por encima de ~6mm exceden los límites de encarrilamiento operacional para la mayoría de los ascensores en movimiento. En promedio, para desplazamientos máximos entre 250mm y 500mm en la interfaz de aislación, la deformación permanente se encuentra en promedio en ~75mm (ASCE 7-16). Así las cosas, el revisor debe usar estos valores para estimar el nivel de global de daño en la edificación, tanto en la superestructura, en la interfaz aislada y en los pisos de servicio que están debajo y encima de esta para corroborar que tanto los elementos estructurales, los equipamientos, las acometidas de servicio y demás elementos de la edificación que atraviesa la interfaz de aislación pueden tolerar estas demandas.

En general, las deformaciones permanentes dependen de muchas variables, pero principalmente del periodo de la interfaz de

aislación (periodo de los aisladores), el desplazamiento de fluencia y la fuerza de fluencia del aislador, que a su vez son muy dependientes de los materiales, mecanismos y geometrías que componen el aislador. El revisor debe confirmar esta deformación permanente, y si los aisladores en conjunto aún aportan estabilidad vertical a las columnas ante estos niveles de deformación, y cuántos deben ser reemplazados mediante los ensayos de la sección 2.6. (ASCE 41-17) y (ASCE 7-16) aprobando la una metodología que puede ser usada para estimar este valor preliminarmente.

2.4.2 Disipadores sísmicos

Comprobar el desempeño para disipadores es relativamente menos complejo puesto que todo el daño se concentraría en la superestructura ya que no existe interfaz de aislación. El desempeño global de la estructura dependerá principalmente de la deformación lateral y de la aceleración de entrepiso y que pueden ser obtenidos como se explica en 2.4.1.1 para la superestructura con aisladores sísmicos.

Aquí el revisor debe recordar que, hasta este momento, el desempeño supone cierta capacidad de respuesta, en términos de desplazamiento, velocidad y fuerza máxima asumidas en el análisis que deben ser confirmadas con los ensayos de la sección 2.6.

2.5 Aceptación o rechazo de límites de variación de propiedades nominales asumidas para el análisis y el diseño estructural

Una vez aceptado el nivel desempeño con el propietario, el revisor debe evaluar la pertinencia de los límites de variación de las propiedades nominales que se han supuesto en el análisis y diseño estructural hasta aquí. Lo anterior, con el fin de delimitar los rangos de variación superior e inferior a aceptar en los ensayos de verificación posteriormente y así revisar el proyecto ante estos. Estos límites se conocen como $\lambda_{\text{superior}}$ y $\lambda_{\text{inferior}}$ y multiplicaran las propiedades nominales de un aislador o de un disipador, como por ejemplo pero no limitadas a rigidez efectiva lateral y axial,

fuerza de respuesta cortante y axial, desplazamiento máximo, fuerza cortante residual, deformación residual, capacidad de carga axial, rigidez axial etc.

2.5.1 Aisladores sísmicos

El revisor puede construir una formulación a partir de (AASHTO 1999) y que ha sido eventualmente usada en ediciones posteriores de (ASCE 41-17) y (ASCE 7-16). En esencia esta puede tener la siguiente forma con ciertos límites propuestos:

$$\lambda_{superior} = \left(1 + \left(FS * (\lambda_{vida\ útil,max} - 1) \right) \right) * \lambda_{prototipo,max} * \lambda_{manufactura,max} \geq 2.1$$

$$\lambda_{inferior} = \left(1 - \left(FS * (1 - \lambda_{vida\ útil,min}) \right) \right) * \lambda_{prototipo,min} * \lambda_{manufactura,min} \leq 0.60$$

Donde:

$\lambda_{vida\ útil}$: representa el rango máximo o mínimo de variación de la propiedad nominal del aislador a lo largo de su vida útil incluyendo efectos de envejecimiento, degradación natural y por ambiente (corrosión, humedad, etc.), ambientales y de contaminación. Este valor tiene una gran incertidumbre puesto que el ingeniero no posee información de antemano acerca de la vida útil de los aisladores. Por esta razón, se le recomienda tomar como guía valores históricos de la literatura o confiar inicialmente en valores prometidos por el fabricante. Se recomienda que diseñador y revisor establezcan un protocolo de pruebas para explorar estos efectos en el proyecto puesto que estas variaciones son altamente dependientes de los materiales y las geometrías de un aislador específico. El mejor método para la determinación de estos valores es realizar ensayos rigurosos a escala real que permitan caracterizar estos valores. Es posible que después de realizadas las pruebas anteriores, estos valores pueden aumentar, basado en literatura existente (ASCE 7-16) la rigidez post fluencia de un aislador elastómero con núcleo de plomo puede asumirse con aumentos de 1.4x. La

resistencia lateral de un deslizador de fricción con polímeros puede asumirse que aumenta 2.52x si usa superficies lubricadas o engrasadas y 1.56x para no lubricadas. Estos valores también varían de acuerdo con la vida útil que se considere, por lo tanto, aprobar el tiempo de reemplazo establecido por el diseñador para aisladores es importante si se quiere incluir mayor confiabilidad a estos valores máximos y mínimos de variación.

Para calcular estos valores, el revisor debe evaluar si es apropiado considerar que las variables ocurren al mismo tiempo o no. Por ejemplo, es muy probable que corrosión y degradación natural por envejecimiento ocurran al mismo tiempo, pero no temperatura. Puede entonces multiplicarlas todas entre si y luego multiplicarlas por un valor FS ~0.75, por ejemplo, si asume que todas no actúan en simultaneidad. Alternativamente, puede tomar la más extrema de todas (máxima o mínima) y usar un FS = 1 en la formulación si está seguro que las otras variables no actuaran al mismo tiempo.

FS: es un valor de ajuste por simultaneidad cuando se asume que todas las variables de la vida útil no actúan simultáneamente, usualmente ~0.75, o 1 si se tiene certeza de la variable más extrema y que actúa de manera independiente. FS=1 se recomienda para estructuras de alta importancia o de infraestructura crítica (ASCE 7-16).

$\lambda_{prototipo}$: representa el rango máximo o mínimo de variación de la propiedad nominal del aislador capturado durante el ensayo de prototipo descrito en la sección 2.6.1. El revisor debe verificar si este valor asumido por el diseñador representa correctamente la variación máxima o mínima evidenciada correspondiente a efectos de velocidad, desgarramiento, fluencia y máximo desplazamiento durante un ensayo, basándose en ensayos de calificación anteriores o literatura existente. Debe comprobar al momento del ensayo para el proyecto.

$\lambda_{manufactura}$: representa el rango máximo o mínimo de variación de la propiedad nominal que le será permitido al fabricante para cada tipo de aislador o para cada aislador individual del proyecto y que

captura la tolerancia de la calidad de la manufactura. Si el diseñador ha especificado este rango para cada tipo de aislador en el proyecto, esta variación corresponde a la diferencia entre la propiedad nominal (ej: fuerza de fluencia 1000kN y axial de 5000kN) y el promedio de esta para los aisladores de un mismo tipo (ej: todos los aisladores con fuerza de fluencia de 1000kN, axial, rigidez, y geometría similares), por lo tanto, el revisor debe identificar luego de los ensayos de producción (sección 2.6.2) cuál fue el máximo en un aislador individual para dicho tipo de aislador y verificar que esa variación no causa riesgo para el diseño de la estructura en puntos críticos (ej: estabilidad vertical en columnas, fuerzas en conexiones, amortiguamiento asumido etc.). Por el contrario, y debido a que no es fácil establecer correctamente lo que un “tipo” de aislador significa, es recomendable que el revisor recomiende un valor máximo y mínimo realista para que aplique para cada aislador individual del proyecto y así simplifique la verificación del lado de la seguridad. El revisor debe corroborar estos valores de variación al momento del ensayo de producción.

Si se supone que se está revisando un edificio de alta importancia, como un hospital, y se está contemplando un deslizador de fricción con algo de lubricación, la variación en la fuerza cortante de resistencia por envejecimiento que incluya aplastamiento del polímero, degradación natural, corrosión, etc. puede ser 1.8x, y por contaminación 1.4x debido a que gran parte del área de contacto va a estar libre y si se ignoran efectos de temperatura, entonces el $\lambda_{vida\ útil, \max} = 1.4 \times 1.8 = 2.52$ y si se asumen como 1 para los mínimos respectivamente, el $\lambda_{vida\ útil, \min} = 1 \times 1 = 1$. Por otra parte, basado en estudios ensayos de prototipo anteriores, es posible que se observe que un máximo variación para todos los ciclos de ensayos de +/-30%, entonces el $\lambda_{prototipo, \max} = 1.3$ y $\lambda_{prototipo, \min} = 0.7$. Para tolerancias de manufactura es razonable suponer un +/-30% de variación en consecuencia con lo asumido para prototipo. Este valor es también razonable para cada unidad

individual y así evitar la complejidad de definir cada “tipo” de aislador del proyecto. Entonces, $\lambda_{manufactura, \max} = 1.3$ y $\lambda_{manufactura, \min} = 0.7$. Al tratarse de un hospital, FS =1. Con estos valores se puede obtener:

$$\lambda_{superior} = \left(1 + (1 * (2.52 - 1))\right) * 1.3 * 1.3$$

$$\lambda_{superior} = 4.25 \geq 2.1$$

$$\lambda_{inferior} = \left(1 - (1 * (1 - 1))\right) * 0.7 * 0.7$$

$$\lambda_{inferior} = 0.49 \leq 0.60$$

Posteriormente, al verificarlos o modificarlos según corresponda, ante los resultados de los ensayos para el proyecto (ver sección 2.6), el revisor debe verificar que la variación superior $\lambda_{superior} = 4.25$, o inferior, $\lambda_{inferior} = 0.49$ de la propiedad nominal en cuestión (fuerza de resistencia cortante en este ejemplo) aún está dentro de los requerimientos mínimos (derivadas, cortante basal, fuerzas de conexiones, amortiguamiento asumido, etc.) del objetivo de desempeño aceptado para el proyecto en el paso anterior 2.4.

Si este mismo ejercicio se realiza para la propiedad nominal de fuerza de fluencia y/o de rigidez de postfluencia de un aislador elastoméricos con o sin núcleo deformable, por ejemplo, los valores estimados serían del orden de $\lambda_{superior} = 2.36$, y $\lambda_{inferior} = 0.49$. Esto sucede porque los aisladores elastoméricos han sido usados desde hace mucho más tiempo en puentes y edificios y existe certeza adicional en la literatura acerca de su envejecimiento y degradación (cristalización u otras). Esto no quiere decir que una categoría de aislador sea necesariamente mejor que otra a partir de estos números, puesto que sólo los ensayos del proyecto revelarán al revisor los valores apropiados.

2.5.2 Disipadores sísmicos

Desafortunadamente, en el caso de disipadores no existe suficiente fundamento teórico para establecer formulaciones similares de estimación a aquellas que se pueden usar para aisladores. A partir del (ASCE 41-13) se evidencia un intento de

forzar, para disipadores, una suerte de adaptación de la formulación expuesta en 2.5.1., sin embargo, el poco respaldo teórico no motiva a un uso confiable. Entonces, para este caso, el trabajo del revisor es casi que virtualmente dependiente de los ensayos de prototipo, producción y control de calidad a realizarse para el proyecto, en el caso que el ingeniero haya usado la formulación explicada en 2.5.1. como guía preliminar o resultados directos asumidos de otros ensayos anteriores.

2.6 Verificación de límites de variación de propiedades nominales asumidas para el análisis y el diseño estructural en los ensayos del proyecto

Luego de haber aceptado los límites de variación superior, $\lambda_{\text{superior}}$, o inferior, $\lambda_{\text{inferior}}$, para el proyecto, el revisor debe verificar a través de los ensayos mínimos requeridos para un proyecto con aisladores sísmicos o disipadores sísmicos. Esta verificación es equivalente a la que se hace para el concreto en obra, para poder asegurarse de que el proyecto estructural asume hipótesis de diseño válidas. En general, las propiedades $\lambda_{\text{superior}}$, producirán un aumento en las fuerzas de diseño y reducción en desplazamientos y las de tipo inferior, $\lambda_{\text{inferior}}$, producirán un aumento en los desplazamientos máximos y reducción de fuerzas y rigideces. El propósito de este paso es que el revisor confirme los valores asumidos en 2.5 y/o los modifique de acuerdo con los hallazgos de los ensayos. En caso de ser modificados deberá solicitar el análisis estructural ajustado del proyecto ante estos nuevos límites de variación.

2.6.1 Ensayos de prototipo

Estos ensayos están descritos en (ASCE 41-17) o en (ASCE 7-16). Aquí, el revisor debe tomar la máxima y mínima variación encontrada en por lo menos 3 ciclos a la deformación SMP para todas las propiedades nominales mediante un número suficiente de ensayos dinámicos a escala real de por lo menos dos unidades que representen cada tipo a usar en el proyecto y sus correspondientes cargas verticales, y así verificar si $\lambda_{\text{prototipo, max}}$ y $\lambda_{\text{prototipo, min}}$ corresponden a los que el diseñador asumió para el

análisis estructural y que fueron analizados en 2.5. Este es también el momento para proponer un ensayo que permita validar los valores asumidos para $\lambda_{\text{vida útil, max}}$ y $\lambda_{\text{vida útil, min}}$. El revisor debe prestar atención a que las velocidades dinámicas de ensayo sean representativas de los cambios que las propiedades nominales podrían tener. Una forma de asegurarlo es que todos los ensayos de prototipo se repitan en por lo menos dos velocidades dinámicas, una el doble de la otra, para confirmar o descartar independencia de la velocidad y así poder caracterizar correctamente el tipo de aislador o disipador.

Adicionalmente, una prueba representativa a la fatiga se recomienda para aquellos aisladores que no tienen un sistema independiente de sacrificio para fuerzas de viento (asumiendo que este sistema de sacrificio será ensayado por separado), para disipadores dependientes de la velocidad, y para aquellos disipadores confirmados independientes de la velocidad cuya fuerza de activación este muy cerca de la carga de viento (ej: 0.7x). Dos mil ciclos a la carga y desplazamiento de viento de diseño se recomiendan para disipadores y por lo menos 20 ciclos para aisladores sísmicos con su correspondiente carga axial. Sin embargo, en el caso de aisladores se advierte que el programa de ensayos es apenas representativo de los requerimientos mínimos y se invita al revisor a explorar con el fabricante ensayos adicionales que caractericen correctamente estos efectos (ASCE 7-16).

En proyectos de tamaño mediano o grande, es posible que el revisor encuentre resistencia por parte del fabricante a realizar los ensayos dinámicos debido al tamaño de los aparatos y a la magnitud de sus propiedades nominales. El revisor debe evaluar si es apropiado que se realicen de manera cuasi estática y usar métodos matemáticos razonables para incorporar estas variaciones en los valores $\lambda_{\text{prototipo, max}}$ y $\lambda_{\text{prototipo, min}}$ encontrados. Por esta razón, los ensayos se deben incluir en el presupuesto del proyecto para evitar sobrecostos.

Ensayos a escala no son recomendados puesto que hay suficiente evidencia de que una diferencia

superior a +/-20% entre las propiedades nominales y las características geométricas de los dispositivos a usar en el proyecto y los ensayados es causa de incertidumbre y dispersión de resultados (ASCE 7-16) y (ASCE 41-17).

2.6.2 Ensayos de producción

Pueden ser los segundos en importancia para un proyecto, porque evalúan las propiedades nominales y sus variaciones en las unidades que serán instaladas en la estructura en cuestión. El revisor debe verificar que las tolerancias encontradas en estos ensayos no sobrepasan los valores especificados en 2.5. para $\lambda_{\text{manufactura, max}}$ y $\lambda_{\text{manufactura, min}}$. En caso de que sobrepasen estos valores, el revisor debe escoger entre dos opciones: solicitar la fabricación de unidades que cumplan con el diseño propuesto o solicitar al diseñador el ajuste del análisis estructural del proyecto con los nuevos límites de variación obtenidos.

2.6.2.1 Aisladores sísmicos

En el caso de los aisladores sísmicos, se esperaría que 3 ciclos ensayados dinámicamente puedan ser suficientes para evaluar las tolerancias por manufactura en cada uno de los aisladores a usar en el proyecto. Para el caso de aisladores elastoméricos con o sin núcleo dúctil deformable, se ha aceptado como práctica que el ensayo se haga, con su correspondiente carga vertical, a una fracción del desplazamiento SMP (ej: 0.67x) (ASCE 7-16) puesto que el llevarlos a la totalidad del desplazamiento los podría deteriorar. Los deslizadores de fricción deberían ser capaces de ser evaluados a la totalidad de su desplazamiento SMP.

2.6.2.2 Disipadores sísmicos

Se esperaría igualmente que 3 ciclos ensayados dinámicamente puedan ser suficientes para evaluar las tolerancias por manufactura en cada uno de los disipadores a usar en el proyecto. Sin embargo, el revisor debe verificar la pertinencia del ensayo para el tipo de disipador a usar. Por ejemplo, en el caso de dispositivos dependientes de la velocidad, el revisor debe no sólo hacer los ensayos al desplazamiento SMP sino también a una velocidad

que reproduzca la fuerza SMP. Por otra parte, si el revisor ha confirmado que los disipadores no son dependientes de la velocidad por medio de los ensayos de 2.6.1, estos ensayos dinámicos se pueden hacer a una velocidad que represente las características encontradas en el prototipo y a fuerzas y desplazamientos SMP. En el caso de disipadores que dependen de la fluencia y ductilidad para disipar energía, el revisor debe aprobar un ensayo indirecto. Por ejemplo, puede ensayar a las fuerzas y desplazamientos SMP al menos una unidad por cada tipo de disipador a usar en el proyecto (ASCE 7-16). Aunque existirá incertidumbre en el resto de las unidades, es aceptable si se entiende que este tipo de disipadores ofrecen un nivel limitado del aseguramiento de la calidad.

2.6.3 Ensayos de control de calidad

Este ensayo es tal vez el más importante de todos porque es probable que el revisor no pueda asistir a los ensayos de producción puesto que los fabricantes usualmente restringen el acceso a sus prácticas productivas. Estos son los únicos ensayos donde el diseñador puede verificar que los resultados de los ensayos de producción y los del proyecto son veraces.

3 ciclos completos reversibles en un porcentaje unidades a instalar en el proyecto escogidas aleatoriamente por el revisor o el diseñador, y en su presencia, deberían ser suficiente para corroborar los hallazgos reportados en los ensayos de producción y que permitieron verificar $\lambda_{\text{manufactura, max}}$ y $\lambda_{\text{manufactura, min}}$.

Al la fecha, sólo el (INN - Chile 2017) , solicita este tipo de ensayos explícitamente, sin embargo, (ASCE 41-13), (ASCE 7-16) y otros, dejan a cargo del diseñador o ingeniero responsable y del revisor la implementación de un programa de control de calidad de la producción.

2.6.3.1 Inspección, mantenimiento y verificación de calidad en el tiempo

El revisor debe exigir un programa que permita la verificación de la calidad de los dispositivos

instalados en la edificación durante la vida útil de la estructura, y así verificar de forma más precisa los valores estimados para $\lambda_{\text{vida útil, max}}$ y $\lambda_{\text{vida útil, min}}$. Para esto, es una práctica común establecer métodos de acceso para aisladores en los pisos de servicio y dejar unidades de reemplazo disponibles en la edificación, así como un manual de montaje y desmontaje que pueda ser usado por el propietario junto con un protocolo de ensayos periódicos a lo largo de la vida útil. Igualmente, las categorías de disipadores que requieren de mantenimiento y/o inspección durante su vida útil deben ser sometidos a un programa periódico. El fabricante deberá dar garantías específicas para cada caso y para cada propiedad nominal de un aislador y un disipador tal que el revisor pueda verificar la pertinencia de este programa periódico en el tiempo. Por ejemplo, es posible predecir en qué momento habrá que lubricar un deslizador de fricción, o reemplazar un elastomérico debido a la cristalización del polímero, o verificar que el núcleo dúctil deformable no esté fracturado por fatiga ante cargas de viento recurrentes. De la misma forma, luego de sismos moderados o por encima del de servicio, deberá verificarse que los disipadores que usan la fluencia y la ductilidad no hayan empezado a trabajar, y si lo han hecho, verificar que no necesiten reemplazo, sobre todo aquellos que tienen el núcleo dúctil oculto dentro de una camisa exterior. Análogamente, disipadores que usen fluidos a presión, deberán ser inspeccionados para garantizar que mantengan los niveles y presiones adecuados.

2.7 Aceptación final del proyecto estructural

A continuación se presenta un diagrama de flujo resumen general de lo expuesto en este artículo.

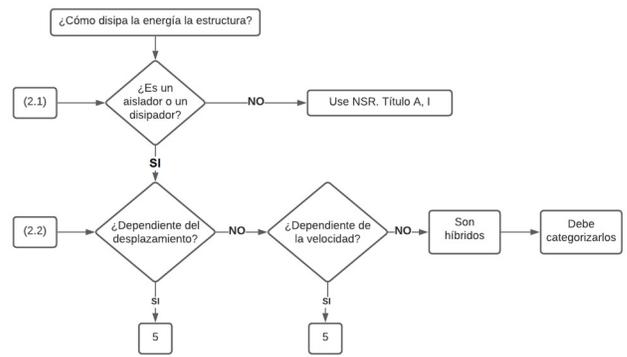


Figura 1 Diagrama de flujo Fase 1 de análisis

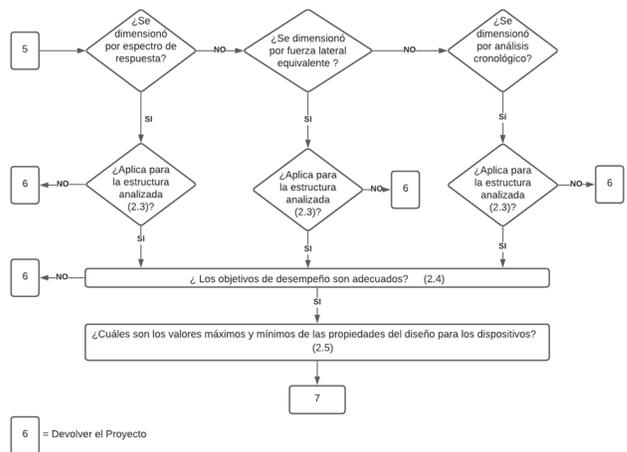


Figura 2 Diagrama de flujo Fase 2 de análisis

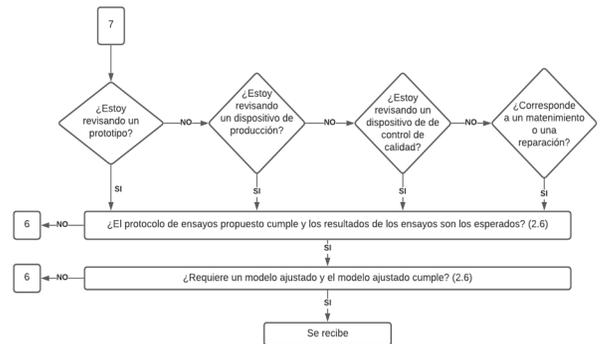


Figura 3 Diagrama de flujo Fase 3 de análisis.

3 CONCLUSIÓN

Este trabajo ha presentado una metodología para que el revisor pueda verificar los aspectos más importantes en un proyecto con aisladores sísmicos o con disipadores sísmicos para garantizar la seguridad de los ocupantes a un nivel igual o superior que el de una estructura diseñada convencionalmente con la NSR-10.

4 REFERENCIAS

AASHTO. *Guide specifications for seismic isolation Design*. Second Edition. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999.

ASCE 41-13. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2013.

ASCE 41-17. *Seismic evaluation and retrofit of existing structures*. Reston, Va, 2017.

ASCE 7-05. *Minimum design loads for buildings and other structures*. Reston, Va, 2005.

ASCE 7-16. *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2016.

«eltelegrafo.» 19 de Abril de 2018. <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/ecuador/1/terremoto-expertos-hospitales-antisismicos-manabi-ecuador> (último acceso: 15 de 06 de 2021).

FEMA. «Earthquake Model.» En *Multi-hazard Loss Estimation Methodology*, de Federal Emergency Management Agency Department of Homeland Security. Washington: Federal Emergency Management Agency, 2018.

INN - Chile. *NCh 3411, Norma Chilena Oficial. Diseño sísmico de edificios con sistemas pasivos de disipación de energía - requisitos y métodos de ensayo*. Santiago,

Chile: Instituto Nacional de Normalización, 2017.

KAD, Bimal, y Gianmario Benzoni. *Evaluation of durability and wear characteristics of viscous fluid dampers for seismic bridges retrofits with significant & Sustained traffic loadings*. Report No. SSRP - 16/12, University of California, San Diego: UCSD, 2017.

MCEER. *Seismic performance Assessment of Seismically Isolated Buildings Designed by the Procedures of ASCE/SEI 7*. Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2018.

NEHRP. «Guidelines for the seismic rehabilitation of Buildings.» FEMA Report 273 y 274, 1997.

NEHRP. «Recommended Provisions for seismic regulations for new building and other structures.» FEMA Report 368 y 369, 2001.

NIST. *ICSSC Recommended Practice (RP) 9. Implementation Guidelines for Executive Order 13717: Establishing a Federal Earthquake Risk Management Standard*. National Institute of Standards and Technology (NIST) Technical note 1922, 2017.

Pardo, Zulma Stella. «Diseño de apoyos de neopreno para puentes. ¿Son suficientes las comprobaciones del código colombiano de diseño sísmico de puentes (CCDSP-95)?» *III Congreso Colombiano y VIII Seminario Internacional de Ingeniería Sísmica*. Cali : AIS, 2005. 1-13.

Ramirez, O. M., y otros. *Development and Evaluation of Simplified Procedures of Analysis and Design for Structures with Passive Energy Dissipation Systems. Technical Report MCEER-00-0010*. Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University of Buffalo., 2001.

«SFGATE.» 19 de Julio de 2013.
<https://www.sfgate.com/bayarea/matier-ross/article/Bay-Bridge-shock-absorbers-spring-leak-4676248.php> (último acceso: 01 de 07 de 2021).

TJT. «Business & Corporate.» *The Japan Times*. 23 de October de 2018.
<https://www.japantimes.co.jp/news/2018/10/23/business/corporate-business/another-japanese-maker-earthquake-shock-absorbers-found-falsified-data/>.

WHITTHAKER, A., y otros. «Code requirements for the design and implementation of passive energy dissipation systems.» En *ATC-17-1 Technical papers on passive energy dissipation*, 497-508. s.f.