

MONOGRAFÍA **42**

**M**

**ESTRUCTURAS CON SISTEMAS  
DE PROTECCIÓN SÍSMICA**

Grupo de Trabajo 5/2  
Estructuras con dispositivos  
antisísmicos

*Aunque la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE) ha hecho un gran esfuerzo por asegurar que toda la información contenida en este documento es correcta y precisa, ACHE, sus miembros y sus trabajadores no aceptan responsabilidad alguna por daños y/o perjuicios de cualquier clase que pudiera originar el uso y aplicación del contenido de esta publicación. Las publicaciones de ACHE están redactadas para ser utilizadas por técnicos con capacidad para evaluar su contenido y por tanto cada lector asume la responsabilidad del uso de la información incluida en el presente documento.*

*Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse o distribuirse de ninguna forma, ni por ningún medio sin la previa autorización por escrito de ACHE.*

*Edita: ACHE (Asociación Española de Ingeniería Estructural)  
I.S.B.N. 978-84-89670-98-3*

*Trabajos editoriales: CINTER Divulgación Técnica*

## Presentación

El proyecto sismorresistente convencional se basa en dotar a la estructura de una adecuada combinación de rigidez, resistencia lateral y capacidad de deformación plástica. Frente a terremotos frecuentes que se pueden dar varias veces en la vida útil de la construcción, las estructuras convencionales se proyectan para que se mantengan en régimen básicamente elástico (sin daños). Sin embargo, aplicar este mismo planteamiento frente a terremotos severos con periodos de retorno del orden de 475 años o más, conduce a estructuras económicamente inviables. Por ese motivo, las normas permiten que se haga uso de la ductilidad de la estructura y que ésta disipe una parte importante de la energía introducida por el terremoto mediante deformaciones plásticas. Admitir deformaciones plásticas implica sin embargo aceptar daños estructurales después del sismo, los cuales pueden ser elevados y conduce en la mayoría de los casos a la demolición de la construcción por no ser económicamente viable su reparación.

Hasta los años 80 del siglo XX esta fue la única filosofía de proyecto sismorresistente, y sus inconvenientes quedaron claramente patentes tras los terremotos de Northridge (1994, EEUU) y Kobe (Japón, 1995). Los elevados daños provocados por estos sismos han marcado un antes y un después en la ingeniería sísmica, y han provocado un cambio de paradigma hacia lo que actualmente se conoce como el Proyecto Sismorresistente Basado en Prestaciones (*Performance Based Seismic Design* PBSD). En el marco de este paradigma, el objetivo al que se dirige actualmente la ingeniería sísmica es el de producir estructuras con daños controlados (y cuantitativamente predecibles) frente a diferentes niveles de la acción sísmica. Una manera de materializar y conseguir de forma eficiente este objetivo consiste en el empleo de sistemas avanzados de protección sísmica, como el aislamiento de base o los disipadores de energía. Ambas soluciones se enmarcan dentro de lo que se denominan estructuras con sistemas de control pasivo y constituyen el tema central de esta monografía. Las estructuras con sistemas de control pasivo permiten mejorar el comportamiento sísmico y las prestaciones de las construcciones a niveles inimaginables e inalcanzables con las estructuras convencionales: reducciones drásticas de las aceleraciones de respuesta por debajo del 20% de la aceleración de la gravedad en caso de sismos muy severos, o la ocupación inmediata de la construcción tras el terremoto porque los daños son nulos o muy reducidos. Además de disponer de una adecuada capacidad sismorresistente que evite la pérdida de vidas humanas, las construcciones deben poder recuperar rápidamente su actividad tras un evento sísmico severo. Resistencia y recuperación rápida son dos aspectos clave de la resiliencia de las construcciones.

# Monografía

El aislamiento de base es la estrategia de proyecto sismorresistente probablemente más efectiva para proteger las estructuras frente a terremotos. Permite reducir drásticamente los daños estructurales y no estructurales, y limitar las aceleraciones absolutas de respuesta a valores muy bajos. El principio básico de esta estrategia es incrementar el periodo fundamental de vibración de la construcción para alejarla del rango de periodos en el que los terremotos suelen introducir mayores cantidades de energía. A cambio, hay que aceptar desplazamientos horizontales muy elevados de la superestructura respecto al suelo. En el caso de edificios, acomodar estos desplazamientos en las instalaciones eléctricas, sanitarias, mecánicas etc. puede conducir a soluciones constructivas complejas.

Una alternativa a las estructuras con aislamiento de base son las estructuras con dispositivos disipadores de energía. Este tipo de sistemas aprovechan los desplazamientos o velocidades relativas entre los puntos que conectan los disipadores, para que éstos absorban la mayor parte de la energía introducida por el terremoto. De esa forma, se evita movilizar deformaciones plásticas en los elementos resistentes de la estructura principal, encargada fundamentalmente de soportar las cargas gravitatorias. Los disipadores de energía actúan como “fusibles” sísmicos, que pueden ser reemplazados tras uno o varios sismos severos. La efectividad de las estructuras con disipadores de energía está hoy en día ampliamente reconocida, y su empleo esta creciendo de forma exponencial en países con alta sismicidad, especialmente en estructuras singulares de gran altura. En Europa su uso es todavía muy incipiente, entre otros motivos por la falta de un tratamiento normativo dentro del actual Eurocódigo 8. Esta deficiencia se subsanará en la próxima generación de la normativa europea, que incorpora un capítulo específico a las estructuras con disipadores de energía.

Las estructuras con disipadores de energía tienen por delante varios retos interrelacionados entre sí. El primero es ser económicamente competitivas para que su uso se pueda extender a construcciones de baja o mediana altura situadas en regiones de moderada o baja sismicidad. Eso pasa por desprenderse de restricciones injustificadas que, si bien podían tener sentido hace dos décadas cuando estos sistemas se empezaban a utilizar, hoy en día no tienen ninguna razón de ser a la luz de la experiencia acumulada en el comportamiento de estructuras con disipadores sometidas a terremotos fuertes y los avances en la investigación. En algunas normativas las estructuras con disipadores de energía siguen siendo rehenes de las estructuras convencionales, estando sometidas a limitaciones pensadas para las segundas que no tienen justificación en las primeras. Detrás de estas limitaciones hay una filosofía equivocada que entiende los sistemas de disipación de energía como un conjunto de elementos auxiliares destinados a mejorar las prestaciones (por ejemplo, reducir desplazamientos máximos) de las estructuras convencionales en las que se instalan, en vez de entender el sistema de disipación de energía como el responsable fundamental de la capacidad sismorresistente de la construcción, a la que el resto de la estructura puede auxiliar aportando cierta capacidad de disipación.

Es absurdo e irracional proyectar la estructura principal que soporta las cargas gravitatorias de una construcción con disipadores de energía con la misma o similar resistencia lateral y requisitos constructivos orientados a conseguir ductilidad que debería tener como estructura convencional sin

disipadores. La incorporación del sistema de disipación de energía permite reducir la resistencia de la estructura principal a menos de la mitad, al tiempo que disminuye drásticamente sus desplazamientos laterales y el daño en la misma. En un contexto de cambio climático acelerado y escasez de recursos naturales, la optimización de este tipo de estructuras y la reducción de costes (directos de construcción e indirectos de reparación después de un sismo) ya no es una opción sino una obligación.

El segundo reto importante es avanzar en el desarrollo e implementación en las normas de nuevos métodos de proyecto y cálculo sísmico más adecuados a las estructuras con sistemas de control pasivo. Nos estamos refiriendo a la metodología basada en el balance energético de Housner-Akiyama, propuesta en la segunda mitad del siglo XX. El conocido documento Vision 2000 sobre el futuro de las normativas sísmicas y que constituye el inicio del PBSO, identifica esta metodología como uno de los enfoques más prometedores a los que debe orientarse el proyecto sismorresistente en el siglo XXI. Los métodos basados en el balance energético de Housner-Akiyama son particularmente apropiados para proyectar estructuras con aislamiento de base o con disipadores de energía. De momento, los métodos basados en el balance energético de Housner-Akiyama están únicamente implementados en la normativa japonesa desde 2005, para verificar estructuras convencionales (sin disipadores) y estructuras con disipadores de energía de tipo histerético. Se trata de cortar amarras con los métodos tradicionales basados en fuerzas e incluso con los más recientes basados en desplazamientos. Los métodos basados en fuerzas han prestado un valioso servicio a la ingeniería sísmica durante décadas y su principal virtud es la simplicidad. Ésta simplicidad es consecuencia principalmente de dar al sismo un tratamiento similar al que se da al resto de cargas que actúan en la estructuras. Pero las deficiencias de los métodos basados en fuerzas, su incapacidad para cuantificar el daño y abordar el efecto de carga del terremoto en su verdadera naturaleza (energía), los ha dejado claramente obsoletos.

Los métodos basados en desplazamientos son un paso en la buena dirección al trabajar con una caracterización directa de la respuesta no lineal de la estructura (curva de capacidad). Sin embargo, están centrados en la predicción de los desplazamientos o deformaciones máximas, y no tienen en cuenta de forma explícita la naturaleza cíclica de las acciones sísmicas ni los efectos del tiempo de duración del terremoto. Son incapaces por ello de cuantificar el efecto de las deformaciones plásticas acumuladas, que es una componente fundamental del daño. Los métodos basados en la curva de capacidad de la estructura obtenida mediante un cálculo estático no-lineal con el método del empuje incremental, presentan deficiencias teóricas e inconsistencias que han sido bien establecidas en la literatura. Una de ellas es que el propio cálculo estático no lineal empleando el método del empuje incremental carece de una base teórica rigurosa. Otra deficiencia notable es representar la energía disipada mediante deformaciones plásticas por un amortiguamiento viscoso equivalente, a pesar de que no existe ningún principio físico que justifique la existencia de una relación estable entre energía disipada en una excursión de desplazamiento máximo y un amortiguamiento viscoso (especialmente en sistemas con elevados niveles de plastificación).

# Monografía

Los métodos basados en el balance energético trabajan con el producto de fuerza por desplazamiento —energía— caracterizando tanto la demanda como la capacidad mediante esta magnitud escalar. La energía incluye mucha más información sobre el daño en la estructura que los desplazamientos. A diferencia de las fuerzas que son magnitudes vectoriales, el carácter escalar de la energía permite sintetizar en un único valor los complejos efectos 3D que se dan en las estructuras sometidas simultáneamente a varias componentes del movimiento del suelo. Las principales ventajas de plantear el proyecto sismorresistente en términos de energía deriva el hecho probado de que la cantidad de energía que un terremoto determinado introduce en una estructura es muy estable, y depende fundamentalmente de la masa total de la misma y del periodo fundamental de vibración. Otros factores como el amortiguamiento, el nivel de plastificación, o la tipología estructural tienen una influencia menor y despreciable a efectos de proyecto, si se compara con la variabilidad inherente de las acciones sísmicas. Por desgracia, en la próxima (segunda) generación de los Eurocódigos los métodos basados en el balance energético sólo se van a incorporar en el proyecto de estructuras con disipadores de energía, quedando para el futuro su extensión a las estructuras convencionales.

La incorporación de sistemas de disipación de energía permite conseguir estructuras sismorresistentes mucho más económicas (especialmente si, como se ha indicado más arriba, se tiene en cuenta no sólo el coste inicial de construcción sino el de reposición o reparación después de un sismo), y con un comportamiento sísmico drásticamente superior al de las estructuras convencionales. Permite optimizarlas, no sólo reduciendo las secciones de los elementos estructurales, sino también desde el punto de vista de utilización racional de las propiedades de los materiales. A modo de ejemplo, el elevado límite de fluencia de los aceros de alta resistencia es una propiedad que se puede aprovechar al máximo para resolver la parte de la estructura encargada de soportar las cargas gravitatorias (estructura principal), para lo cual no es necesaria la ductilidad. Por el contrario, los aceros de bajo límite elástico poseen una elevada ductilidad que se puede explotar al máximo empleándolos como disipadores de energía. Además, el empleo de aceros de alta resistencia para la estructura principal permite reducir las secciones y aumentar su flexibilidad lateral, lo cual es una cualidad altamente deseable cuando se van a combinar con disipadores de energía. Los beneficios que aportan los disipadores de energía son tan claros, que resulta difícil imaginar un futuro en el que alguna construcción situada en zonas sísmicas no incorpore dispositivos de este tipo.

Esta monografía se ocupa de los dos sistemas de protección sísmica expuestos anteriormente, abordándolos desde una óptica fundamentalmente práctica y aplicada. La variedad de dispositivos de aislamiento de base y de disipación de energía es muy amplia y crece cada día como fruto de la intensa investigación que se realiza a nivel internacional, y la incorporación de nuevos materiales como las aleaciones con memoria de forma. Por cuestiones de espacio, esta monografía no cubre todos los dispositivos existentes sino que se centra en los más empleados. Tras una descripción básica del principio de funcionamiento de los mismos, la monografía describe brevemente distintos métodos para proyectar estructuras con sistemas de control pasivo y la forma de verificarlas siguiendo algunas normativas sísmicas en vigor o de próxima

# Monografía

implementación. Todo ello se completa con el desarrollo de ejemplos. La monografía se centra en la normativa europea y en la normativa norteamericana. Por cuestiones de espacio no se ha extendido a otras normas de referencia internacional como las normas ISO sobre las que se apoyan numerosos contratos de obra internacionales, o normativas más avanzadas como la de Japón, aunque ésta última ha sido una fuente primordial en el desarrollo del nuevo capítulo sobre proyecto de estructuras con disipadores de energía que incorporará la próxima generación de los Eurocódigos. Los destinatarios principales de la monografía son los profesionales que se dedican al proyecto y cálculo estructural, pero pretende ser también una herramienta docente útil en programas avanzados o cursos de Máster de Escuelas Técnicas.

Madrid, Agosto 2021

Amadeo Benavent Climent

## **Grupo de trabajo GT5/2 “Estructuras con dispositivos antisísmicos”**

**Coordinador:** Benavent Climent, Amadeo

**Autores (por orden alfabético):**

Benavent Climent, Amadeo  
Betancour, Nelson  
Bozzo, Luis  
Cascales, Jorge  
Delgado García-Pomareda, Jorge  
Donaire Ávila, Jesús  
Escolano Margarit, David  
García Vega, Luis  
Gómez Mateo, Javier  
Grandío, Pablo  
Ivorra, Salvador  
Iturregui, Carlos  
Jordán, Javier  
López-Almansa, Francisco  
López, Ignacio  
Martínez Rodrigo, María Dolores  
Morillas Romero, Leandro  
Muñoz Díaz, Iván  
Nuzzo, Iolanda  
Rodríguez Morales, Sergio  
Rubio Peiroten, Diego

El uso del contenido de esta monografía queda bajo la única responsabilidad del lector, declinando tanto ACHE como sus autores cualquier responsabilidad sobre sus contenidos o del uso que se haga de los mismos.



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
1.1. Antecedentes de los sistemas de protección sísmica .....	13
1.2. Tipos de disipadores de energía.....	14
1.3. Empleo de disipadores en estructuras nuevas y en estructuras existentes.....	15
<b>2. DISIPADORES DE ENERGÍA DEPENDIENTES DEL DESPLAZAMIENTO.....</b>	<b>17</b>
2.1. Consideraciones generales .....	17
2.2. Disipadores metálicos.....	19
2.2.1. Descripción. Principios de funcionamiento. Ventajas y desventajas.....	19
2.2.2. Comportamiento y modelización .....	30
2.2.3. Estudios experimentales .....	36
2.2.4. Proyecto del disipador. Control de calidad. Exigencias normativas.....	42
2.2.5. Ejemplos de implementación en estructuras reales .....	42
<b>3. DISIPADORES DE ENERGÍA DEPENDIENTES DE LA VELOCIDAD .....</b>	<b>45</b>
3.1. Disipadores basados en fluidos viscosos.....	45
3.1.1. Descripción. Principios de funcionamiento. Ventajas y desventajas.....	45
3.1.2. Comportamiento y modelización .....	46
3.1.3. Estudios experimentales .....	47
3.1.4. Proyecto del disipador. Control de calidad. Exigencias normativas.....	47
3.1.5. Ejemplos de implementación en estructuras reales .....	49
3.2. Disipadores sólidos viscoelásticos.....	49
3.2.1. Descripción. Principios de funcionamiento. Ventajas y desventajas.....	49
3.2.2. Comportamiento y modelización .....	56
3.2.3. Estudios experimentales .....	58
3.2.4. Proyecto del dispositivo. Control de calidad. Exigencias normativas.....	59
3.2.5. Ejemplos de implementación en estructuras reales .....	61

<b>4. AISLADORES DE BASE.....</b>	<b>63</b>
4.1. Aisladores elastoméricos .....	63
4.1.1. Descripción. Principios de funcionamiento. Ventajas e inconvenientes.....	63
4.1.2. Comportamiento y modelización .....	66
4.1.3. Estudios experimentales .....	69
4.1.4. Proyecto del dispositivo. Control de calidad. Exigencias normativas.....	71
4.1.5. Ejemplos de implementación en estructuras reales .....	76
4.2. Dispositivos que permiten el deslizamiento horizontal .....	78
4.2.1. Descripción. Principios de funcionamiento. Ventajas y desventajas.....	78
4.2.2. Comportamiento y modelización .....	80
4.2.3. Estudios experimentales .....	81
4.2.4. Proyecto del dispositivo. Control de calidad. Exigencias normativas.....	81
4.2.5. Ejemplos de implementación en estructuras reales .....	83
4.3. Muelles metálicos.....	83
4.3.1. Descripción. Principios de funcionamiento. Ventajas y desventajas.....	83
4.3.2. Comportamiento y modelización .....	84
4.3.3. Estudios experimentales .....	84
4.3.4. Proyecto del dispositivo. Control de calidad. Exigencias normativas.....	84
4.3.5. Ejemplos de implementación en estructuras reales .....	85
<b>5. PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS CON DISIPADORES .....</b>	<b>87</b>
5.1. Norma ASCE/SEI 7-16 .....	87
5.1.1. Descripción general .....	87
5.2. Eurocódigos.....	103
5.2.1. Descripción general .....	103
5.2.2. Método espectral no lineal .....	112
5.2.3. Método basado en el balance energético.....	132
5.2.4. Método basado en cálculos dinámicos directos .....	150
5.3. Influencia de los disipadores en propiedades dinámicas y en la respuesta de las estructuras .....	152
5.3.1. Definición de la estructura y de la acción sísmica .....	152
5.3.2. Análisis modal espectral en régimen elástico.....	157
5.3.3. Análisis con métodos estáticos no lineales .....	159
5.3.4. Análisis mediante cálculos dinámicos directos.....	166

5.3.5.	Comparación de respuestas obtenidas con diferentes métodos .....	169
5.4.	Estructura con disipadores viscosos lineales verificada con Eurocódigos.....	170
5.4.1.	Definición de la estructura y acciones a considerar.....	170
5.4.2.	Verificación general .....	176
5.4.3.	Verificaciones adicionales en la estructura .....	178
5.5.	Estructura con disipadores dependientes del desplazamiento verificada con Eurocódigos.....	185
5.5.1.	Descripción de la estructura y acción sísmica considerada.....	185
5.5.2.	Verificación de la estructura con el método del balance energético .....	192
5.5.3.	Verificación de la estructura mediante cálculos dinámicos directos .....	203
<b>6.</b>	<b>PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS CON AISLAMIENTO DE BASE ...</b>	<b>205</b>
6.1.	Conceptos generales.....	205
6.2.	Norma ASCE/SEI 7-16 .....	210
6.2.1.	Ámbito de aplicación.....	210
6.2.2.	Requisitos fundamentales.....	210
6.2.3.	Consideraciones generales.....	210
6.2.4.	Acción sísmica a considerar .....	213
6.2.5.	Factor de comportamiento .....	213
6.2.6.	Propiedades del sistema de aislamiento de base .....	213
6.2.7.	Análisis estructural.....	214
6.3.	Eurocódigos.....	218
6.3.1.	Ámbito de aplicación.....	218
6.3.2.	Escenarios sísmicos a considerar.....	218
6.3.3.	Consideraciones generales de proyecto .....	218
6.3.4.	Acción sísmica a considerar .....	221
6.3.5.	Análisis estructural.....	221
6.3.6.	Verificaciones para el LS SD .....	225
6.4.	Ejemplos.....	225
6.4.1.	Estructura con aisladores de neopreno aplicando ASCE SEI 7/16.....	225
6.4.2.	Estructura con aisladores de neopreno aplicando EN 1998.....	235

<b>7. PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE PUENTES CON AISLAMIENTO DE BASE ....</b>	<b>241</b>
7.1. Norma AASHTO .....	241
7.1.1. Descripción general .....	241
7.1.2. Ámbito de aplicación.....	242
7.1.3. Requisitos fundamentales.....	242
7.1.4. Consideraciones generales de proyecto .....	242
7.1.5. Acción sísmica a considerar .....	243
7.1.6. Análisis estructural.....	243
7.2. Eurocódigos.....	244
7.2.1. Descripción general .....	244
7.2.2. Requisitos fundamentales.....	245
7.2.3. Consideraciones generales de proyecto .....	246
7.2.4. Control de los efectos de torsión.....	250
7.2.5. Acción sísmica a considerar .....	252
7.2.6. Análisis estructural.....	253
7.2.7. Verificaciones de seguridad .....	258
7.2.8. Requerimientos para el sistema de aislamiento de base.....	260
7.3. Ejemplos.....	264
7.3.1. Puente con aisladores de neopreno aplicando la norma AASTHO .....	264
7.3.2. Puente con aisladores de neopreno y núcleo de plomo con AASTHO .....	282
7.3.3. Puente con disipadores viscosos no lineales aplicando la AASTHO .....	289
7.3.4. Puente con aisladores de neopreno y disipadores viscosos no lineales empleando el Eurocódigo .....	302
7.3.5 Puente con aisladores deslizantes de tipo péndulo con norma EN1998 .....	308
 <b>ANEJOS .....</b>	 <b>313</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>347</b>