

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. GENERALIDADES

"The purpose of the earthquake provisions herein is primarily to safeguard against major structural failures and loss of life, not limit damage or maintain function". Esta cita introductoria corresponde a la norma norteamericana de la construcción (UBC 1997), y manifiesta que, en caso de acción sísmica, el daño estructural y no estructural es admisible, siempre que no comporte colapso y pérdida de vidas humanas. Los motivos son de carácter económico: una estructura dúctil presenta aceleraciones absolutas inferiores (y, consecuentemente, también esfuerzos menores) a las producidas en comportamiento lineal y elástico y conduce a secciones de menor dimensión.

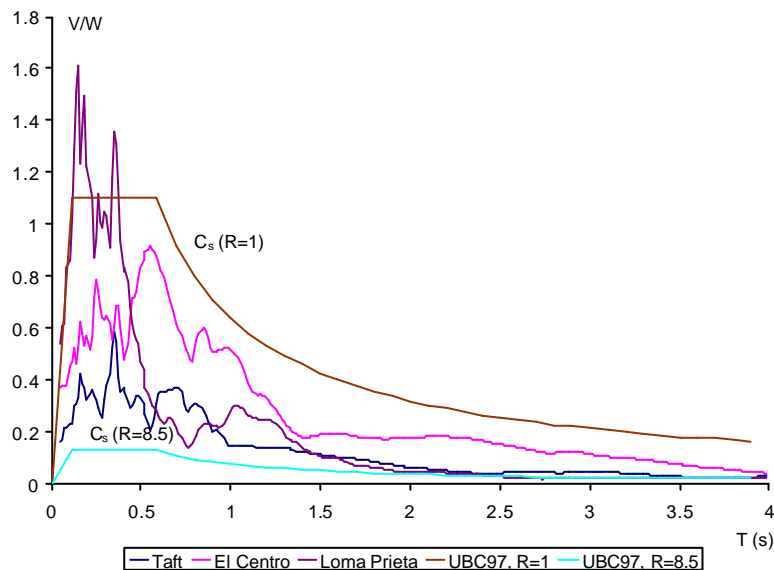


Figura 1.1 Espectros lineales del coeficiente sísmico para los terremotos de El Centro (1940), Taft (1942), Loma Prieta (1989) y coeficiente sísmico según UBC 1997

En la figura 1.1 se representan varios espectros lineales del coeficiente sísmico (el cual se define como el cociente entre el cortante de base,  $V$ , y el peso total del edificio,  $W$ ) obtenidos para los registros de los terremotos de El Centro (1940), Taft (1952) y Loma Prieta (1989). En la misma figura se muestran también

dos curvas del coeficiente sísmico obtenidas a partir de las indicaciones de la norma estadounidense "Uniform Building Code" (UBC 1997), ambas considerando asentamiento en terreno rígido, terremoto tipo "far-field" y edificio de normal importancia. La primera de ellas ( $R=1$ ) correspondería a la respuesta máxima bajo hipótesis de comportamiento lineal y elástico de la estructura, y pone de manifiesto que el cortante de base propuesto por la norma puede resultar inferior a la sollicitación que se produce en caso de sismo severo. La segunda curva ( $R=8.5$ ) se aplicaría a estructuras de máxima ductilidad, y evidencia las reducciones de sección que permite la ductilidad y el hiperestatismo estructural.

El diseño convencional adoptado de forma común por las normas sismorresistentes se basa en los conceptos de ductilidad e hiperestatismo estructural. La normativa americana (UBC 1997), por ejemplo, propone expresiones basadas en fundamentos dinámicos y información experimental, las cuales facilitan el cálculo de unas fuerzas estáticas equivalentes. Éstas incluyen reducciones con respecto a las correspondientes a un comportamiento lineal y elástico en función de la ductilidad e hiperestatismo estructural, atribuible a la tipología estructural empleada. En caso de edificios que presenten irregularidades, se permite la determinación de las anteriores fuerzas estáticas equivalentes a partir de un análisis dinámico con comportamiento elástico. La misma norma admite el uso de análisis dinámico no lineal en el tiempo ("nonlinear time-history analysis"), sin embargo resulta un proceso poco viable: se exigen datos experimentales contrastados que avalen los análisis realizados, y una posterior revisión del sistema estructural por un equipo independiente de ingenieros y licenciados expertos en las disciplinas implicadas en los métodos de análisis utilizados.

El daño estructural acontecido tras terremotos como el de Northridge (1994) y Kobe (1995) ha obligado a cuestionar la efectividad de las estructuras convencionales y de los métodos de análisis empleados para valorar su respuesta (Mahín et al. 1998). Se han cuestionado: i) la opacidad de los sistemas de cálculo empleados, ii) la imposibilidad de determinar, a priori, la demanda de ductilidad ante un evento sísmico y dónde se va a producir, iii) la presencia de fallos frágiles en sistemas presupuestadamente dúctiles, iv) la complejidad de detectar el daño en estructuras metálicas cuando éstas no manifiestan desplome y v) el elevado coste en reparación que supone un comportamiento dúctil basado en una disipación de la energía en el seno estructural y de forma dispersa.

Una tendencia actual en el diseño sísmico consiste en buscar sistemas sismorresistentes que localicen la demanda de ductilidad en elementos predeterminados (Bozzo y Barbat 1999). Ello supone claras ventajas: i) resulta más factible garantizar la demanda de ductilidad, ii) el control de calidad en materiales y en ejecución puede ser más intenso en las zonas donde se establece la oferta de ductilidad y iii) el daño resulta más previsible y la reparación más económica que en los sistemas basados en el daño estructural disperso. Algunos sistemas proponen que la oferta de la ductilidad resida en zonas de la propia estructura, como es el caso de los pórticos excéntricos en estructuras de acero (Popov 1980). Otra posibilidad consiste en el empleo de disipadores de energía externos a la estructura. Si bien

forman parte del sistema estructural, se emplean como nexo y ello permite su fácil restitución en caso de sufrir daño.

## 1.2. Objetivo y justificación de la investigación

Existen numerosas propuestas para la protección de los cerramientos de una estructura porticada y ante una acción sísmica: i) desacoplar los pilares y jácenas mediante una abertura, rellena posteriormente con material muy flexible. Esta técnica puede resultar efectiva en la limitación del daño no estructural, pero no aprovecha la capacidad resistente de los cerramientos; ii) Brokken y Bertero (1981) plantean la unión de los cerramientos con los pórticos mediante conectores y mallas metálicas que eviten la rotura de los tabiques. Esta solución aprovecha la resistencia y la rigidez de los cerramientos, pero dificulta enormemente el establecer un modelo de predicción. No tener en cuenta los cerramientos en el modelo resulta una simplificación excesiva y poco real, ya que los cerramientos aumentan de forma significativa la rigidez del edificio y modifican sus características dinámicas; y iii) la conexión entre cerramientos y estructura principal (jácenas y/o pilares) con conectores especiales, introduciendo una abertura al igual que en la primera propuesta, de forma que el "interstory drift" se concentre en los conectores, (Newmark et al. 1971; Yanev et al. 1985; Rao et al. 1996).

La presente tesis se incorpora a la tercera de las opciones anteriormente comentadas. El objetivo fundamental es el desarrollo de un disipador elastoplástico susceptible de ser usado como conector entre muros de mampostería y la estructura principal. El disipador de energía se diseña para formar parte de un sistema sismorresistente dual no estándar, formado por una estructura principal flexible porticada, la cual soporta acciones gravitatorias, y por un sistema más rígido resistente a las acciones horizontales, el cual concentra el proceso disipativo y del que forman parte los disipadores de energía. A esta configuración del sistema dual con disipadores también se la denomina "energy concentration type flexible-stiff mixed structure" (Akiyama, 1985).

El empleo de los disipadores desarrollados hasta el momento en la función descrita con anterioridad presenta los siguientes inconvenientes:

i) Los disipadores que posibilitan fuerzas reducidas, como el ADAS o los viscoelásticos, requieren desplazamientos importantes para que se muestren efectivos en la reducción de la respuesta sísmica (Bozzo et al. 1996).

ii) Los disipadores que plastifican mediante esfuerzo cortante disponen de una elevada rigidez en comportamiento elástico y plastifican a partir de pequeños desplazamientos. Un espesor reducido de su cuerpo disipativo resulta fundamental para limitar la fuerza máxima a un rango de valores apropiado para su utilización como conectores. Para evitar la aparición de la abolladura, los disipadores actuales acceden a espesores reducidos empleando rigidizadores soldados. Sin embargo, la utilización del proceso de soldadura como medio de unión produce efectos adversos,

más acusados en pequeños espesores, propiciando conductas frágiles y la aparición de fisuras.

iii) Los disipadores presentan en su mayoría una rigidez relativamente alta en su plano normal al pórtico. La baja resistencia y flexibilidad de las paredes de mampostería en su plano normal aconseja que los conectores sean flexibles en este plano. Ante la presencia de desplazamiento de entrepiso ("interstory drift") en ambas direcciones, los disipadores concentrarían así la mayor parte del desplazamiento, desarrollando fuerzas acordes con la capacidad resistente del cerramiento.

El objetivo general de la presente investigación, atendiendo al estado del arte actual y a las limitaciones de los actuales disipadores para ser usados como conectores, se ha desglosado en los siguientes puntos:

1. Diseño de un disipador que pueda ser empleado como conector entre una estructura porticada (de acero u hormigón armado) y muros de mampostería, el cual proteja a los elementos no estructurales de la acción sísmica, aprovechando su capacidad resistente. Se han considerado de interés los siguientes requisitos:

- Alta rigidez en el plano de deformación y disipación desde pequeños valores del desplazamiento de entrepiso.
- Fuerza desarrollada por el disipador acorde con la resistencia de los muros de mampostería convencionales.
- Elevada flexibilidad en la dirección normal al plano del pórtico
- Ausencia de soldadura en la zona de deformación plástica
- Proceso disipativo estable
- Fácilmente implementable bajo proceso industrial de CAD-CAM, permitiendo: i) flexibilidad constructiva, ii) repetitibilidad dimensional y de proceso y iii) costes reducidos

2. Realización de una fase experimental de caracterización del disipador. Se analizará la influencia de los cambios de sección en la fatiga dúctil, el fenómeno de la abolladura, la capacidad disipativa del dispositivo, las posibles formas de degradación que éste manifieste y su posible comportamiento no lineal ante la restricción de desplazamiento vertical.

3. Realización de tests dinámicos que permitan observar el comportamiento del disipador en el ámbito estructural propuesto.

4. Desarrollo de herramientas numéricas de predicción del comportamiento de los disipadores.

5. Realización de un estudio paramétrico que ponga de manifiesto los parámetros que gobiernan la respuesta dinámica de una estructura de un grado de libertad con disipadores.

### **1.3. ORGANIZACIÓN Y CONTENIDO DE LA TESIS**

Esta tesis doctoral se ha estructurado en 7 capítulos, y en la parte final se han incluido dos apartados, uno de apéndices y el otro de referencias bibliográficas.

El primer capítulo sitúa la presente tesis dentro del ámbito del diseño sismorresistente, y plantea los objetivos y acciones emprendidas en la presente investigación.

El segundo capítulo recoge el estado del arte en sistemas sismorresistentes avanzados. Una primera parte describe, de forma general, las distintas técnicas avanzadas de control estructural ante sismo. En la segunda parte del capítulo se presenta la investigación realizada hasta el momento, en diseño sismorresistente con disipadores, prestando una mayor atención a los alcances logrados con dispositivos elastoplásticos.

En el tercer capítulo se documenta la respuesta experimental de distintas variantes del disipador propuesto, solicitadas de forma quasi-estática, bien ante sollicitación histerética o monotónica creciente. Se comentan sus características geométricas y las propiedades de los materiales empleados para su construcción, los métodos de ensayo e instrumentación y se incluyen los resultados correspondientes a las mediciones efectuadas. La observación y tratamiento de la información experimental registrada permite, finalmente, establecer pautas de comportamiento comunes entre los distintos dispositivos ensayados y una comparación que permita subrayar qué parámetros de diseño inciden positiva o negativamente en la conducta del disipador.

En el cuarto capítulo se proponen modelos de predicción del comportamiento del disipador. Estos modelos se dividen en los de carácter analítico y los numéricos, y sus resultados son comparados a los obtenidos de forma experimental. Los métodos analíticos permiten determinar los valores de la rigidez elástica del disipador y las deformaciones de inicio de plastificación y de abolladura (basándose en el modelo de Kasai y Popov para pórticos excéntricos). Los métodos numéricos simulan la respuesta del disipador bajo desplazamiento monotónico creciente, permitiendo observar la evolución y distribución de la deformación y de las tensiones en el disipador y proporcionando la curva carga - deformación, así como una predicción de la deformación en la cual se inicia el proceso de abolladura del alma.

En el capítulo quinto se documentan los ensayos dinámicos a que se ha sometido una estructura de un grado de libertad protegida con los disipadores propuestos. Se describen las características de la estructura y de los disipadores empleados, la instrumentación incluida y los métodos de ensayo aplicados. A partir de la información experimental recogida y de su posterior tratamiento, se establecen conclusiones sobre el comportamiento estructural y los beneficios reportados por los disipadores al sistema sismorresistente.

En el capítulo sexto, en su primera parte, se utiliza un modelo numérico para reproducir el comportamiento del sistema estructural ensayado, y se comparan los resultados obtenidos numérica y experimentalmente. Posteriormente, se realiza un estudio paramétrico, determinándose de forma previa los parámetros que influyen en el comportamiento dinámico de un sistema dual (rígido - flexible) del que forman parte los disipadores desarrollados. Finalmente, se obtienen numéricamente espectros no lineales normalizados de la energía introducida y disipada, del desplazamiento máximo y del cortante de base, y se analiza la influencia de los parámetros significativos en el comportamiento del sistema.

El capítulo séptimo se inicia con un resumen de los resultados obtenidos en el transcurso de la investigación y finaliza con un apartado de conclusiones.

En el apartado de apéndices se describen algunos de los procedimientos auxiliares de interés empleados durante los ensayos experimentales. Se comenta en primer lugar como se han dimensionado las uniones atornilladas de los disipadores para que soporten tanto el cortante transmitido como los esfuerzos normales generados por los momentos flectores y por los efectos no lineales geométricos. En segundo lugar se describe el método de cálculo adoptado para determinar la aceleración máxima aplicable a la mesa vibrante durante el "sweep frequency test" para que la estructura no entre en comportamiento plástico. Finalmente, se documenta el procedimiento adoptado para medir el desplazamiento entre la parte superior de la estructura porticada y la mesa vibrante, llevado a cabo a partir de galgas extensométricas situadas en los soportes.