

Capítulo 7

SUMARIO Y CONCLUSIONES

7.1 SUMARIO

En este trabajo se ha desarrollado un nuevo disipador histérico elastoplástico (figura 7.1), construido con acero estructural, para la protección de edificios ante la acción sísmica, el cual permite ser utilizado en un sistema dual no estándar (con disipadores) como conector ("link") entre su estructura flexible y su subsistema rígido (cerramientos). A través de una abertura ("gap") entre los cerramientos y la estructura principal (pilares y jácenas), rellena con material flexible, y donde el disipador actúa como conector entre jácena y cerramiento, se puede eliminar el daño no estructural y linealizar la respuesta de los cerramientos, si: i) se evita la colisión entre los elementos rígidos y flexibles y ii) la fuerza transmitida a los cerramientos resulta adecuada a su capacidad. Siempre que se cumplan las anteriores condiciones, además de potencialmente eliminar el daño estructural y no estructural, es posible utilizar la capacidad de carga de los cerramientos ante la acción horizontal sísmica, y contabilizar su aportación a partir de modelos numéricos de relativa simplicidad.

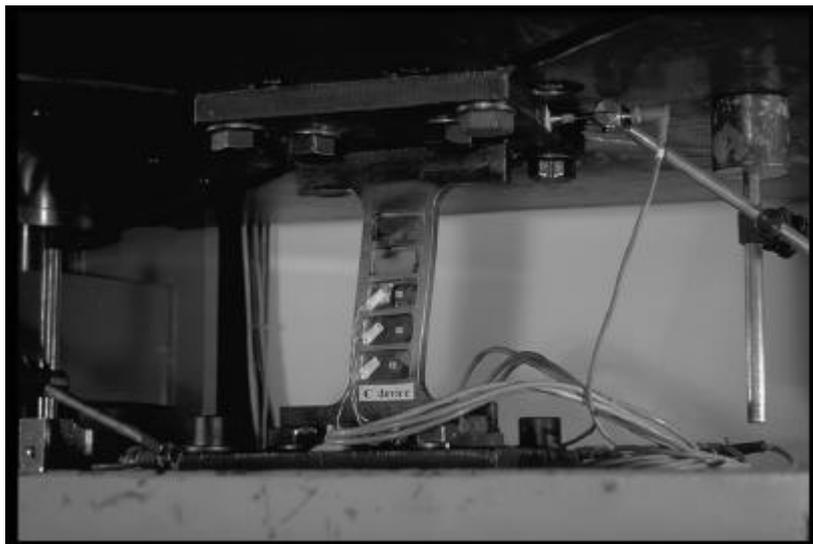


Figura 7.1 Disipador por esfuerzo cortante desarrollado en esta tesis

Resulta de importancia en el esquema anteriormente expuesto que el comportamiento del disipador sea predecible y que realice su función disipativa desde pequeños rangos de deformación, dado que si no es este el caso no se lograría proteger los elementos no estructurales. Se han caracterizado de forma experimental variantes del mismo disipador, analizándose la influencia de sus parámetros geométricos en sus curvas de respuesta, en su capacidad disipativa y en su estabilidad. A partir de los resultados experimentales obtenidos, se han propuesto y validado modelos analíticos para la predicción simple de los parámetros de inicio de plastificación (fuerza y desplazamiento) y se ha validado el modelo de Kasai y Popov para la predicción de la abolladura en el disipador propuesto. También se ha modelizado por elementos finitos el comportamiento del disipador en régimen de deformación monotónica creciente. Los resultados numéricos se han contrastado con los experimentales en su respuesta en el plano (a través de su curva fuerza - deformación) y en su respuesta transversal, con la aparición de abolladura en el alma.

Para comprobar la efectividad del disipador como conector, (reduciendo el cortante de base a partir de valores bajos del "interstory drift") se ha solicitado dinámicamente (con mesa vibrante y a partir de réplicas a distinta escala del registro de Santa Cruz - Loma Prieta, 1989) una estructura porticada con dos disipadores actuando como "links" entre el sistema flexible porticado y sendos muros de hormigón armado. Su respuesta ha sido procesada y contrastada con los resultados de un modelo numérico de no linealidad concentrada, donde los muros de cortante y la estructura porticada asumen un comportamiento lineal.

Finalmente, se ha realizado un estudio paramétrico de un sistema de un grado de libertad con disipadores. El modelo numérico empleado para los análisis parte del comportamiento real del sistema disipativo, adoptando una relación entre la rigidez del disipador y del muro ($K=K_H/K_M$) y un coeficiente de endurecimiento n iguales a los observados experimentalmente, con valores de 0.65 y 0.275 respectivamente. Se ha definido un parámetro g como la relación entre las rigideces del sistema flexible y del sistema rígido y se ha estudiado su influencia. La fuerza de plastificación se ha adoptado proporcional a la fuerza inercial máxima desarrollada por un sistema infinitamente rígido sometida a la acción observada, siendo η el parámetro de proporcionalidad empleado. Se han obtenido espectros de respuesta no lineales para variaciones de los parámetros h (0.1, 0.25 y 0.5) y γ (0.1, 0.3 y 0.5), manteniendo uno u otro constantes. Se han analizado las siguientes variables en forma normalizada: energías introducida y disipada por el sistema, aceleración máxima absoluta, desplazamiento máximo relativo y la demanda de ductilidad. Los espectros se han generado a partir de cuatro registros frecuentemente recurridos: tres de ellos tipo "far field" sobre terreno firme, condiciones en las cuales los disipadores se han mostrado muy efectivos, y para un registro tipo "near fault", (Sylmar - Loma Prieta), para observar si los disipadores mantienen su efectividad ante este tipo de registros, caracterizados por la presencia de pulsos largos.

7.2 CONCLUSIONES

Las principales características del dissipador desarrollado son: i) su cuerpo disipativo, fabricado a partir de un único bloque de acero y con proceso de fresado, carece de elementos soldados; ii) en comportamiento elástico presenta una elevada rigidez en el plano de disipación y resulta muy flexible en su plano normal; iii) su proceso de fabricación permite secciones transversales reducidas y de pequeño espesor, las cuales suponen esfuerzos de plastificación bajos si se emplean materiales apropiados; y iv) como consecuencia de las dos anteriores características, el dispositivo requiere de pequeños desplazamientos para iniciar el proceso de disipación. Sus características lo convierten en adecuado para utilizarlo como conector ("link") en sistemas duales no estándar (con dissipadores) entre muros de mampostería (sistema rígido) y pórticos de flexión (sistema flexible), además de su uso convencional como dissipador en pórticos de acero y de hormigón armado.

Si los dissipadores se rigidizan convenientemente, éstos presentan un comportamiento histerético estable. A través de la norma americana "Uniform Building Code" (UBC 1997) se puede establecer la distribución de los rigidizadores, y a partir del valor de la inercia I_0 definido por Bleich (1952), se pueden dimensionar para que se comporten como elementos rígidos. Se ha observado que, pese al poco espesor del cuerpo disipativo, que limita la altura de los rigidizadores, éstos consiguen el valor mínimo de I_0 a partir de espesores muy reducidos. Las cuatro variantes ensayadas de forma histerética ofrecen una eficiencia superior al 76%, si se comparan con dispositivos con comportamiento bilineal sin endurecimiento (perfectamente plásticos). La variante *AI* presenta la deformación angular acumulada g_r más elevada de los cuatro dispositivos, indicando que la presencia de radio de transición en las zonas de cambio de sección transversal no mejora el comportamiento histerético, no siendo necesaria por tanto su presencia para mejorar la resistencia a la fatiga dúctil. Una razón aceptable podría ser que la presencia de radio comporta una reducción de la sección del alma donde se produce disipación.

La deformación cortante se distribuye con bastante uniformidad en la totalidad del alma, aumentando ésta, conforme aumenta el desplazamiento. La diferencia máxima observada en deformación, para un desplazamiento de 5 mm, ha sido del 41%, observándose ésta entre las zonas extremas y laterales del dissipador y su zona central. De forma visual y previa a la degradación del alma, se constata el predominio de la deformación por cortante, por encima de la deformación por flexión, observándose claramente una pérdida de ortogonalidad en el entramado formado por alas y rigidizadores. La deformación angular calculada a partir de las mediciones de la galga central en el dispositivo *BI*, sometido a deformación monótonico creciente, guarda un gran paralelismo con la deformación angular calculada a partir del cociente entre el desplazamiento y la altura del alma sin rigidizar con espesor constante, con diferencias inferiores al 17% para un desplazamiento de 10 mm.

Después de iniciar el proceso de degradación del alma, los dispositivos mantienen una cierta capacidad disipativa en un segundo modo de deformación. Las alas y los rigidizadores conforman una subestructura que disipa energía a partir de la formación de rótulas plásticas por flexión y por la deformación plástica a tracción - compresión de las alas, debido a los efectos geométricos no lineales. Con el desplazamiento vertical restringido, la evolución de la fuerza vertical manifiesta una inflexión cuando el alma empieza a degradar, aumentando de forma considerable y llegándose a valores entre 2 y 3 veces los máximos, previa degradación. Este segundo modo de disipación por flexión es importante, dado que permite obtener un disipador más robusto ante eventuales terremotos extremos, aunque cabe tener precaución con los efectos verticales anteriormente mencionados.

Las principales características del disipador propuesto se pueden predecir con un éxito relativo usando expresiones analíticas simples. El cortante de inicio de plastificación obtenido analíticamente presenta diferencias inferiores al 6% respecto a su valor experimental. Sin embargo, la rigidez numérica de los disipadores, en comportamiento elástico, resulta un 25% inferior a la real. Esta diferencia se atribuye a la propia flexibilidad de las uniones atornilladas. El modelo de Kasai y Popov para la predicción de la abolladura ofrece valores de desplazamiento de abolladura superiores en un 25% a los observados experimentalmente, sin embargo cabe decir que se ha realizado un solo ensayo, y dada la incidencia de las imperfecciones geométricas en el resultado, cabría realizar una más amplia campaña de ensayos para confirmar la bondad del método.

La curva de respuesta del disipador resulta altamente predecible numéricamente (FEM) a partir de la curva tensión - deformación del material a tracción simple y modelo de plasticidad basado en el criterio de von Mises y adopción de "isotropic work hardening". Con discretización regular del cuerpo disipativo, en 3D, y suponiendo comportamiento rígido de las pletinas de anclaje, se ha planteado un modelo con hexaedros de 8 nodos. Los resultados numéricos obtenidos presentan una diferencia con el cortante de plastificación experimental del orden del 3.3%, y del 24 % en relación a la rigidez (este último valor muy próximo al observado a partir de modelos analíticos, y que refuerza la hipótesis de que la flexibilidad de las uniones influye en la rigidez elástica del disipador). En comportamiento plástico, las diferencias máximas con relación a la respuesta experimental se sitúan por debajo del 3%. Cabe señalar que se ha constatado experimentalmente una reducción muy importante del escalón de cedencia en el material del disipador en relación con el observado por el material en su ensayo a tracción simple, y que el éxito de la bondad del modelo se debe a la consideración de esta reducción del escalón de cedencia. La determinación de la abolladura a partir de una fuerza transversal equivalente conduce a configuraciones deformadas muy parecidas a las observadas en la realidad, ofreciendo diferencias respecto a los valores previstos por la expresión empírica de Kasai y Popov del 4% (por debajo) y superiores en un 20 % respecto al valor obtenido experimentalmente.

Los ensayos experimentales a través de la sollicitación de una estructura porticada con disipadores entre sus dinteles y muros de hormigón (sistema rígido)

muestran que el disipador puede ser empleado como conector. La estructura solicitada dinámicamente en mesa vibrante ha manifestado un claro comportamiento no lineal desde pequeños desplazamientos, y para un desplazamiento máximo de la estructura de 6.5 mm, ha manifestado una reducción del cortante de base del 33% en relación a su respuesta lineal y elástica, y un desplazamiento máximo 9 veces inferior al de la estructura porticada sin disipadores y comportamiento elástico. La reducción de cortante se ha obtenido pese a que la plastificación del disipador ha comportado que el período fundamental de la estructura se desplazara a zonas más resonantes del espectro de respuesta, con aumentos importantes del "input" energético. En todos los ensayos realizados, la estructura porticada se comporta en el rango lineal elástico.

La simulación numérica del comportamiento de la estructura ensayada ha sido llevada a cabo a partir de un análisis paso a paso, concentrando el proceso no lineal en los disipadores. Los resultados numéricos manifiestan una mejor correlación con los obtenidos experimentalmente cuando el proceso de plastificación está más desarrollado, tanto en su respuesta máxima (cortante y desplazamiento) como en su energía disipada, manifestando diferencias inferiores al 5% en estos parámetros.

A partir de los resultados obtenidos en el estudio paramétrico, se han observado las siguientes pautas de comportamiento para estructuras de un grado de libertad con disipadores:

- El parámetro de cortante de plastificación η influye en la energía introducida a la estructura, disminuyendo su influencia conforme aumenta la flexibilidad del sistema.
- Para estructuras rígidas, un valor excesivamente bajo del parámetro η comporta demandas de ductilidad insostenibles para un disipador elastoplástico y desplazamientos excesivos. Un valor adecuado de η favorece demandas de ductilidad aceptables, desplazamientos inferiores entre un 30 y un 70% a los manifestados por estructuras sin rigidizar y aceleraciones absolutas del mismo orden a las ofrecidas por éstas.
- Para estructuras de rigidez media y para valores de η medios se han obtenido aceleraciones un poco superiores a las del sistema sin rigidizar y reducciones en desplazamientos entre un 20 y un 70%. La demanda de ductilidad y los desplazamientos para valores bajos de η siguen siendo excesivos para este rango de períodos.
- Para estructuras flexibles, un valor de η elevado (0.5) reduce e incluso impide la disipación plástica, y conduce a aceleraciones próximas al sistema rigidizado. La aplicación de valores reducidos de η disminuye la aceleración máxima absoluta entre 2 y 3 veces la correspondiente a la estructura rigidizada y conduce a desplazamientos del mismo orden de magnitud.

- Valores reducidos de γ comportan una mayor demanda de la ductilidad del sistema disipativo.
- El valor de γ incide poco en la aceleración absoluta máxima del sistema
- El valor de γ incide en las energías introducida y disipada por el sistema de forma significativa.
- Los sistemas con γ reducidos disipan un porcentaje mayor de la energía introducida al sistema que los que disponen de γ más elevados, de forma más acusada conforme aumenta el período natural. Ello conduce a un mejor comportamiento de los sistemas con γ reducidos.

Si bien los espectros energéticos manifiestan una clara dependencia en relación con el período fundamental, se ha observado que los parámetros h y γ inciden significativamente en los mismos, siendo su influencia más acusada en estructuras rígidas. El modelo de predicción de Housner resulta también más eficaz en estructuras flexibles, ofreciendo como resultado valores siempre inferiores a los observados experimentalmente.

Una predicción más precisa de la respuesta estructural y de la demanda de energía disipada requiere análisis no lineales paso a paso, similares a los realizados en el presente trabajo. El modelo que se ha empleado en esta tesis para reproducir el comportamiento real de una estructura de un grado de libertad con disipadores, ha conducido a resultados en buena consonancia con los observados experimentalmente, y resultaría útil para la predicción del comportamiento de estructuras reales con cerramientos. En tal caso sería necesario un comportamiento lineal y elástico de los elementos no estructurales, posible, si se limitan sus sollicitaciones a través de disipadores adecuados.