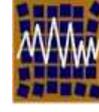




Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e
Ingeniería Antisísmica

N° A16-08 REHABILITACIÓN DE UN PÓRTICO DE CONCRETO REFORZADO MEDIANTE DISIPADORES DE ENERGÍA PASIVOS METÁLICOS

Juan A. Marín ¹ y Daniel M. Ruiz ²

1.- Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Pontificia Universidad Javeriana.

e-mail: juanale81@hotmail.com

2.- Profesor Asistente e Investigador del grupo Estructuras. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana.

Carrera 7a. No 40-62. Tel: (571)3208320 Ext 5375

e-mail: daniel.ruiz@javeriana.edu.co

RESUMEN

Con base en ensayos de laboratorio y modelos analíticos se evaluó la efectividad del uso de disipadores de energía pasivos metálicos histeréticos construidos en Colombia para la rehabilitación de un pórtico existente de concreto reforzado. Para tal fin se construyeron dos tipos de disipadores de acero de platina ranurada. Estos disipadores fueron sometidos a ciclos de tensión mediante deformación controlada en una máquina universal de ensayos. Con base en esta información se propuso una serie de modelos numéricos con el fin de establecer analíticamente resultados similares a los obtenidos en los ensayos de laboratorio. A continuación se procedió a modelar analíticamente el comportamiento no lineal dinámico de un pórtico de concreto reforzado existente sometido al efecto de ocho (8) señales sísmicas. Con la información del comportamiento de los disipadores y con base en los modelos analíticos se procedió a la rehabilitación sísmica de la edificación con los disipadores de energía. Los resultados sugieren que el beneficio más importante de la rehabilitación está asociada a una rigidización global de la estructura acompañada de una alta disipación de energía a través de los ciclos de histéresis en los disipadores.

Palabras Clave: Disipadores de energía histeréticos pasivos metálicos, rehabilitación sísmica, concreto reforzado.

1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

La necesidad de desarrollar técnicas o métodos de rehabilitación estructural para edificaciones existentes ha venido cobrando importancia en Colombia en las últimas dos décadas. Esta necesidad se justifica principalmente en dos aspectos: la mayoría de ciudades de Colombia se encuentran ubicadas en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta; y por otro lado, muchas de las edificaciones existentes (construidas antes de que el Código Colombiano de Construcción Sismorresistente de 1984 entrara en vigencia), no fueron diseñadas para soportar cargas sísmicas. Además, una parte de dichas edificaciones están construidas con sistemas estructurales que han demostrado tener grandes deficiencias ante sollicitaciones sísmicas como el sistema reticular celular, que mostró sus falencias en amplia escala en el sismo de Ciudad de México del año 1985.

Las dos tendencias que han surgido en los últimos años en cuanto a rehabilitación de edificaciones existentes son principalmente el aumento de la capacidad de disipación de la energía sísmica en la edificación y la reducción de las fuerzas sísmicas antes de que lleguen a la estructura. Estas técnicas difieren en cierta medida de la premisa tradicional de rehabilitación que se ha impuesto en Colombia en los últimos años que corresponde a un aumento de la rigidez y la resistencia de las edificaciones (principalmente refuerzo con muros estructurales de concreto, aumento de la sección de vigas y columnas).

En Colombia los estudios de rehabilitación a través del uso de tecnologías alternativas están empezando a desarrollarse a pesar de que en otros países latinoamericanos (como Chile y México) se han realizado importantes avances en el desarrollo de dichas tecnologías. Con base en lo anterior se vio la necesidad de realizar una innovación en Colombia a través de la adaptación de un dispositivo de disipación de energía de bajo costo y fácil fabricación en el medio colombiano con el fin de usarlo en la rehabilitación sísmica de pórticos de concreto existentes.

2. LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ESTRUCTURAS

Para entender los beneficios que trae la disipación de energía en edificaciones es necesario considerar la ecuación de equilibrio de energía (I):

$$E_E = E_C + E_S + E_\mu + E_\xi \quad (2.1)$$

donde E_E es energía absoluta sísmica de entrada, E_C es la energía cinética absoluta, E_S corresponde a la energía de deformación elástica, E_μ representa la energía disipada por la acción inelástica, y E_ξ es la energía disipada por medio de amortiguamiento viscoso. Sabiendo que la energía sísmica de entrada es una constante para cada diferencial de tiempo, un incremento en la suma de E_μ y E_ξ llevará a una disminución de la suma de los términos E_C y E_S , en otras palabras, originará una disminución en los

desplazamientos (energía de deformación) y las velocidades de la estructura (energía cinética).

Se debe tener en cuenta además que el término de energía disipada por acción inelástica E_{μ} anteriormente mencionado, se relaciona directamente con los daños sufridos por la estructura como consecuencia de la energía de entrada E_E . El objeto del diseño sísmico con disipadores de energía es básicamente hacer que la energía E_{μ} provoque daños solo en dispositivos que puedan ser fácilmente reemplazados (los disipadores). [Aiken, 1996]

El principio fundamental del funcionamiento de los disipadores es la transformación de la energía externa –sismo- en algún otro tipo de energía como fricción o calor. En la Figura 2.1 se muestran los diagramas de energía para un sistema y una señal sísmica, de tal manera que en la Figura 2.1b) se tiene en cuenta la acción inelástica. De acuerdo con el esquema anterior, se busca esencialmente que la disipación de energía de deformación histerética en las estructuras no se dé en puntos críticos de comportamiento inelástico como las uniones columna-viga, sino en puntos que puedan disipar dicha energía entrando a un ciclo histerético bien controlado, de tal manera que los elementos que disipen la energía no sean importantes estructuralmente.

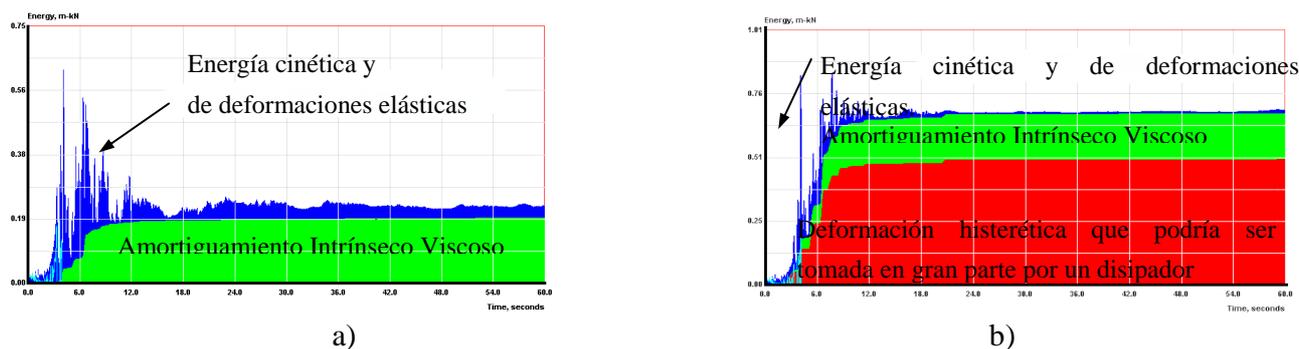


Figura 2.1 a) Curva de energía para un sistema elástico, b) Curva de Energía para un sistema inelástico [NONLIN v6.00]

3. EL DISIPADOR DE ENERGÍA UTILIZADO

El dispositivo utilizado corresponde a un disipador histerético de platina ranurada (Ver Figura 3.1) construido en acero A-36 a escala 1:2 ([Hanson et al., 2001]). Algunos disipadores de geometría similar fueron trabajados previamente por otros autores ([Reyes, 2001] ,[Hanson et al., 2001],[Kunisue et al., 2000]). El modelo del primer disipador construido (Figura 3.1a) es similar al propuesto por Wada et al, 2000 pero con dimensiones distintas. Para el segundo ensayo se propuso una variación de dicho dispositivo, reduciendo a la mitad su área de resistencia a cortante. Estos disipadores se instalan típicamente sujetándolos de las partes inferiores de las vigas y con un par de arriostramientos unidos típicamente a conexiones viga-columna.

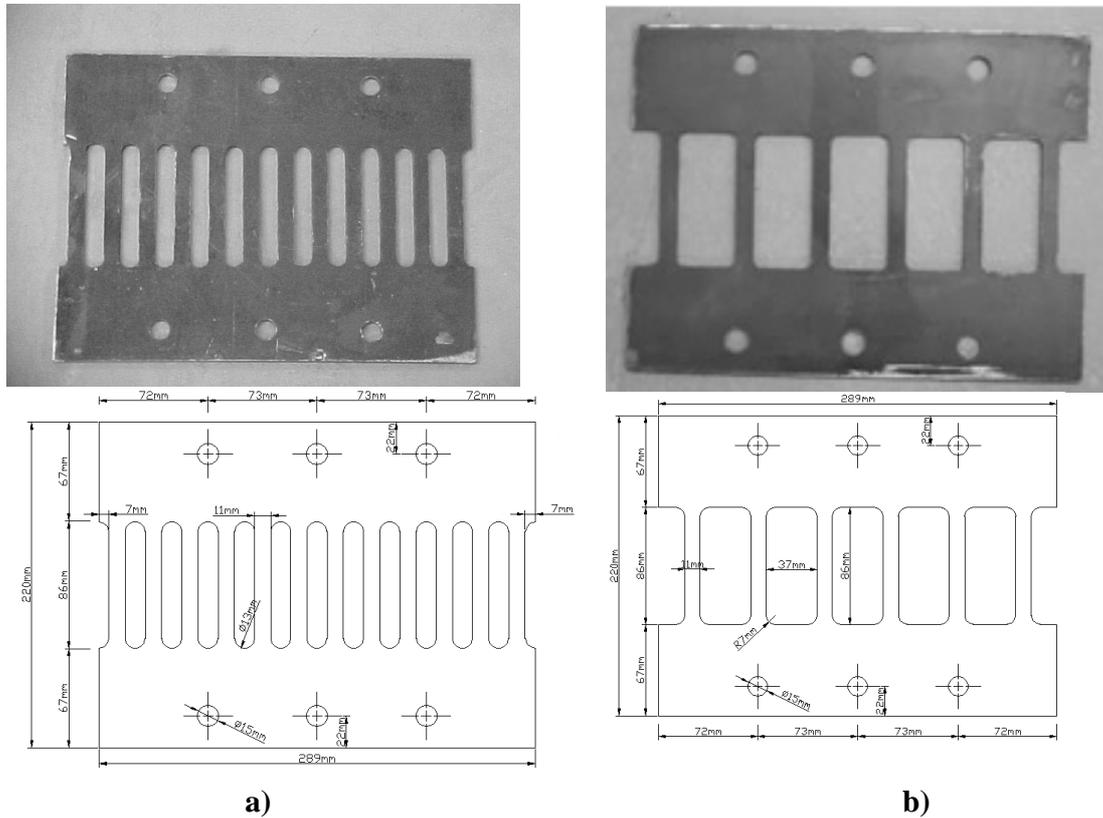


Figura 3.1 a) Disipadores de energía ranurados de 12 columnas b) Disipadores de energía ranurados de 6 columnas

Con el fin de realizar los ensayos sobre los disipadores se diseñó y construyó un marco a través del cual fue posible ensayar simultáneamente dos disipadores de energía. Dicho marco se esquematiza en la Figura 3.2 y es una adaptación del marco desarrollado por [Reyes, 2001]. De acuerdo al diseño del marco, es posible transformar las cargas axiales de una máquina universal de ensayos a una serie de fuerzas cortantes aplicadas en el plano de los disipadores. Adicionalmente, y con el fin de medir los desplazamientos relativos entre los dos extremos de cada disipador, se instalaron un par de deformímetros (LVDT) con los que fue posible caracterizar la curva de fuerza vs. desplazamiento. Cada par de disipadores fue sometido a ciclos de carga y descarga sin recarga controlados por deformación (ensayos pseudoestáticos). Con base en las mediciones realizadas fue posible establecer las características básicas del comportamiento de los disipadores, como lo son las cargas y deformaciones de fluencia, las pendientes elásticas así como pendientes de carga vs. desplazamiento en el rango inelástico.

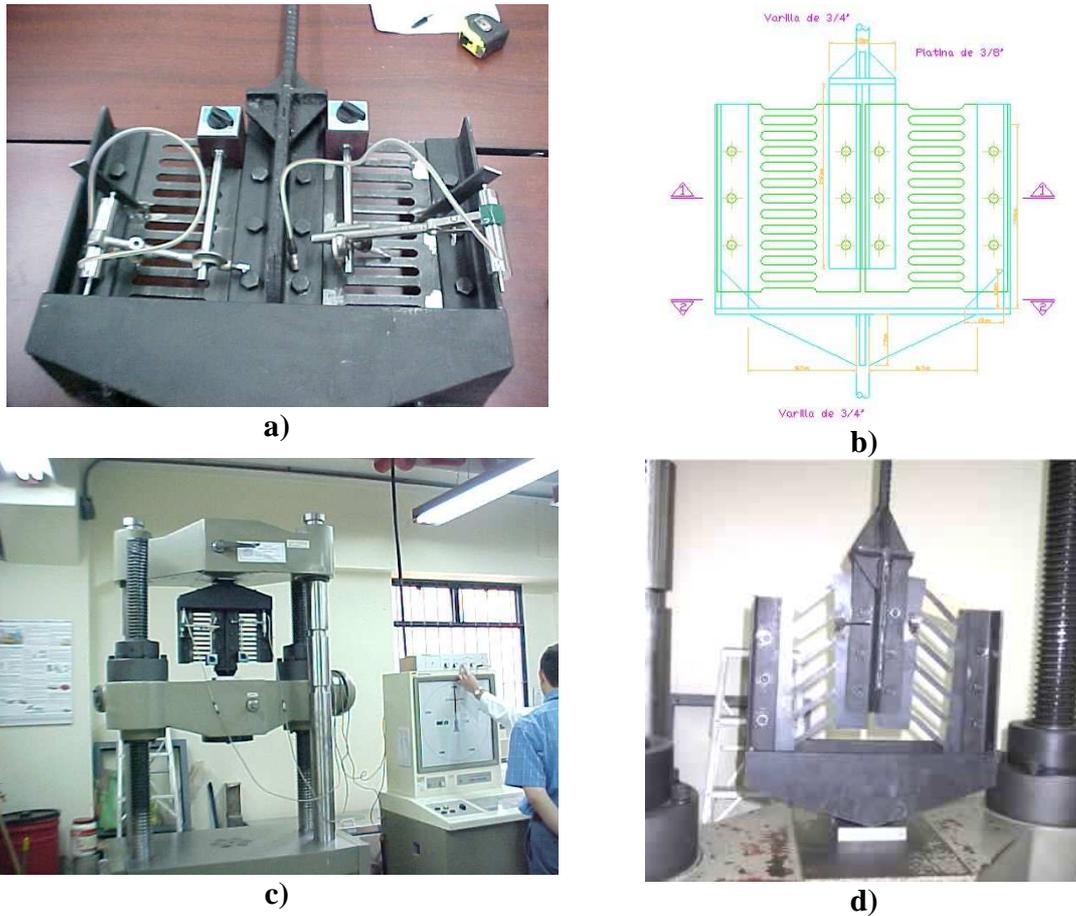


Figura 3.2 Montaje experimental de los disipadores. a) Instalación de deformímetros b) Esquema del marco para ejecutar los ensayos c) ubicación del dispositivo en la máquina universal de ensayos d) Estado final de los disipadores luego del ensayo de laboratorio

Una vez caracterizado experimentalmente el disipador de energía, fue necesario encontrar un modelo de comportamiento matemático que se ajustara bien a los datos y fuera representativo del dispositivo. Se decidió adaptar los datos obtenidos al modelo bilineal, pues este modelo es el más recomendado para disipadores metálicos de comportamiento histérico [Hanson et al., 2001]. Adicionalmente debe mencionarse que a la luz de los resultados experimentales, este tipo de dispositivos tiene un comportamiento estable para múltiples ciclos. Además dichos ciclos de histéresis son simétricos en la descarga y recarga [Reyes, 2001]. En la Figura 3.3 se muestran los datos obtenidos y adaptados al modelo bilineal (Curva de Fuerza vs. Desplazamiento) para el disipador de 12 columnas ensayado.

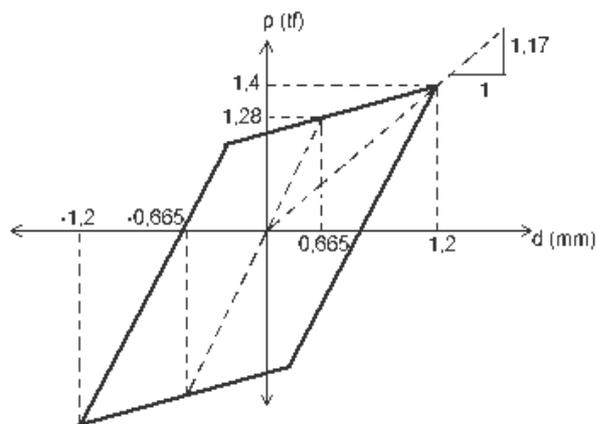


Figura 3.3 Resultados adaptados al modelo bilineal

La siguiente etapa en el estudio experimental consistió en encontrar un modelo computacional para representar las características obtenidas en laboratorio. De la misma manera en esta etapa se corroboraron los resultados experimentales del disipador de energía a través de modelaciones rigurosas por el método de los elementos finitos. Para este caso se desarrolló un modelo mediante elementos tipo cascarón (“Shell”) (Ver Figura 3.4). Debido a la complejidad de este último modelo, es poco práctico usarlo en un análisis no lineal dinámico de elementos tipo barra. Por esta razón se desarrollaron dos diferentes simplificaciones de la modelación de los disipadores. La primera consistió en la asimilación de cada columna del disipador como una columna sometida a cortante puro. Esta suposición se valida con las mediciones realizadas en laboratorio evidenciadas principalmente por la elástica del dispositivo al imponerle la carga (ver Figura 3.2d). El anterior hecho implica representar cada disipador como un arreglo de doce o seis columnas equivalentes dado el caso. La segunda simplificación propuesta consiste en usar una sola columna equivalente con las propiedades combinadas de las doce mencionadas anteriormente. Estas columnas se modelaron con elementos *frame*, adicionándole rótulas plásticas para tener en cuenta el comportamiento no lineal. Para verificar la coherencia de los tres modelos propuestos con los resultados de laboratorio, se llevaron a cabo una serie de calibraciones en el rango elástico e inelástico, cuyos resultados se muestran en la tabla 1. Debe anotarse que los modelos simplificados y el modelo riguroso coincidieron en gran medida con los resultados experimentales. Adicionalmente para asegurar la equivalencia de los modelos simplificados en el rango inelástico, se hizo una comparación de momentos de fluencia y últimos de los modelos de doce y una columnas mediante análisis de fibras por diferencias finitas en el programa XTRACT®. A la luz de estos resultados se demostró que era factible usar la simplificación de una columna equivalente para modelar los disipadores en una edificación, asegurando que se generaría el mismo efecto que con el dispositivo original.

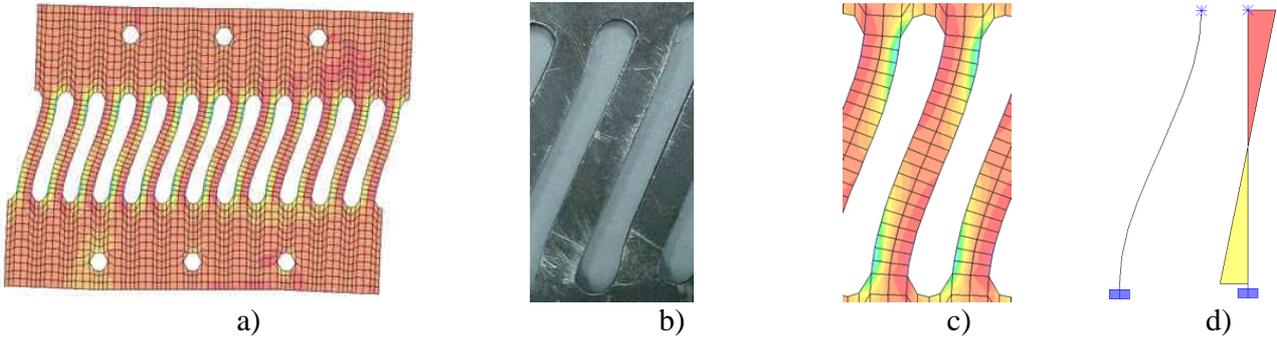


Figura 3.4 Modelos equivalentes propuestos. a) Modelo del dissipador en elementos finitos. b) Forma deformada de las columnas del dissipador c) Deformada en el modelo riguroso d) Columna equivalente

TABLA 3.1 Resultados de la calibración de modelos

	DISIPADOR DE 12 COLUMNAS			
	<i>Resultado Experimental</i>	<i>Modelo con Shells</i>	<i>Modelo de 12 columnas</i>	<i>Modelo de 1 columna equivalente</i>
<i>Carga de fluencia</i>	650 kgf	650 kgf	650 kgf	650 kgf
<i>Desplazamiento de fluencia (mm)</i>	0,31	0,32	0,28	0,28
	DISIPADOR DE 6 COLUMNAS			
	<i>Resultado Experimental</i>	<i>Modelo con Shells</i>	<i>Modelo de 6 columnas</i>	<i>Modelo de 1 columna equivalente</i>
<i>Carga de fluencia</i>	330 kgf	330 kgf	330 kgf	330 kgf
<i>Desplazamiento de fluencia (mm)</i>	0,28	0,28	0,29	0,28

4. REHABILITACIÓN SÍSMICA DE UN PÓRTICO DE CONCRETO REFORZADO CON LOS DISIPADORES DE ENERGÍA PROPUESTOS

Con base en los ensayos de laboratorio y sus respectivas calibraciones se procedió a implementar los dissipadores de energía histeréticos metálicos en la rehabilitación de un pórtico de concreto reforzado de una edificación existente con el fin de establecer su desempeño ante una serie de sismos. El pórtico pertenece a una edificación hospitalaria construida en los años cincuenta en la ciudad de Bogota D.C. con el sistema de entrepiso reticular celular. El pórtico analizado tiene nueve pisos y tres luces, las exteriores de 6 m de longitud y la interior de 2,8 m. Los capiteles son aligerados y tienen una disposición como la que se muestra en la Figura 4.1.

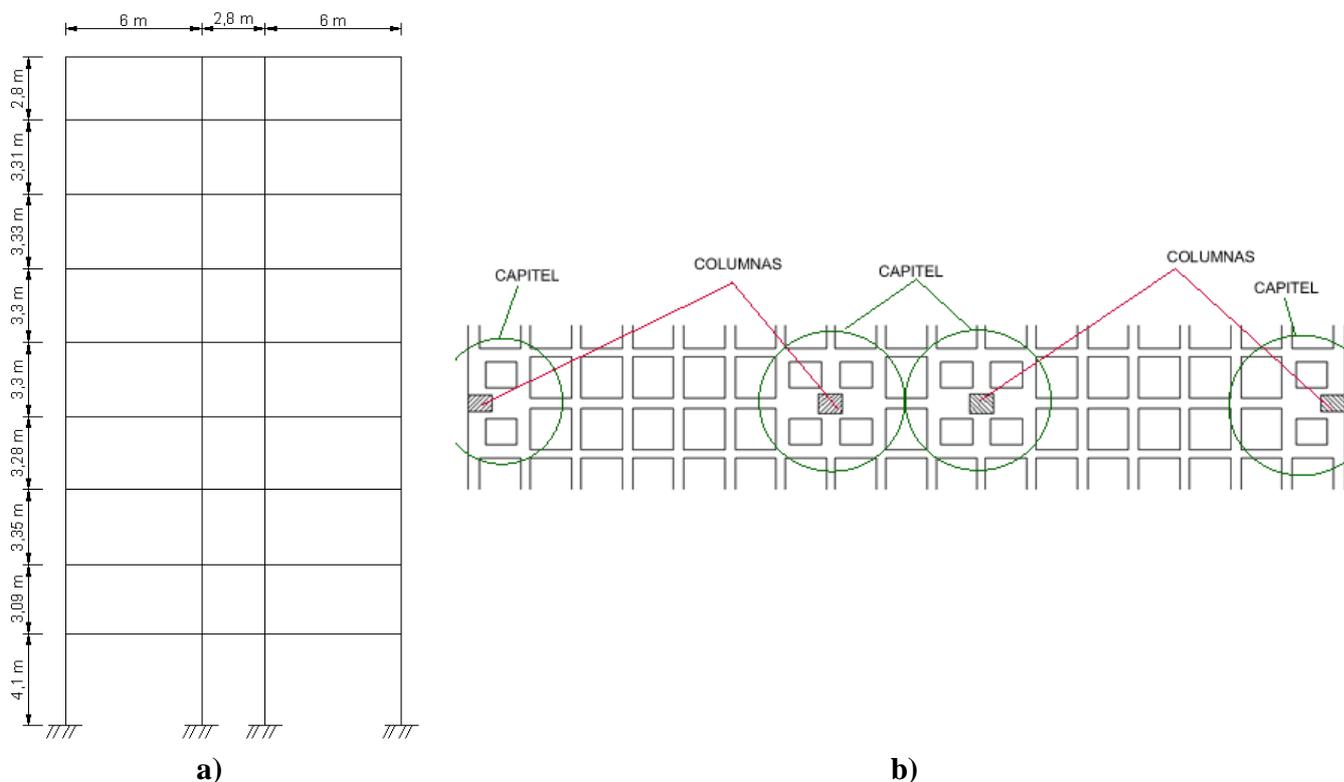


Figura 4.1 Características del pórtico modelado a) Pórtico a rehabilitar b) Planta típica de reticular celular en esta estructura

El esquema de rehabilitación propuesto para esta estructura consistió en la instalación de dos disipadores por piso, siempre en el vano central y alternado de vano en los exteriores (ver Figura 4.2). Se escoge esta configuración porque se ha probado que es una de las más eficientes [Hanson et al., 2001], y además en otra fase de este trabajo se determinó que la colocación del disipador exterior en el mismo vano no tenía una incidencia significativa en la respuesta de la estructura. En este sentido se da libertad a las necesidades arquitectónicas. La disposición en elevación de la rehabilitación con disipadores se muestra en la figura 4.2. Otro aspecto importante al considerar una rehabilitación es la forma en que se van a unir los disipadores a la estructura existente. La opción más viable de las consideradas en este trabajo es la unión de un solo disipador a la viga central de las tres que unen los capitales. Esta viga necesitará en la gran mayoría de los casos un reforzamiento de la sección. Debe anotarse que el pórtico se modeló mediante una viga equivalente para tener en cuenta el aporte de las tres vigas que unen los capitales y de esta manera poder trabajar un modelo plano.

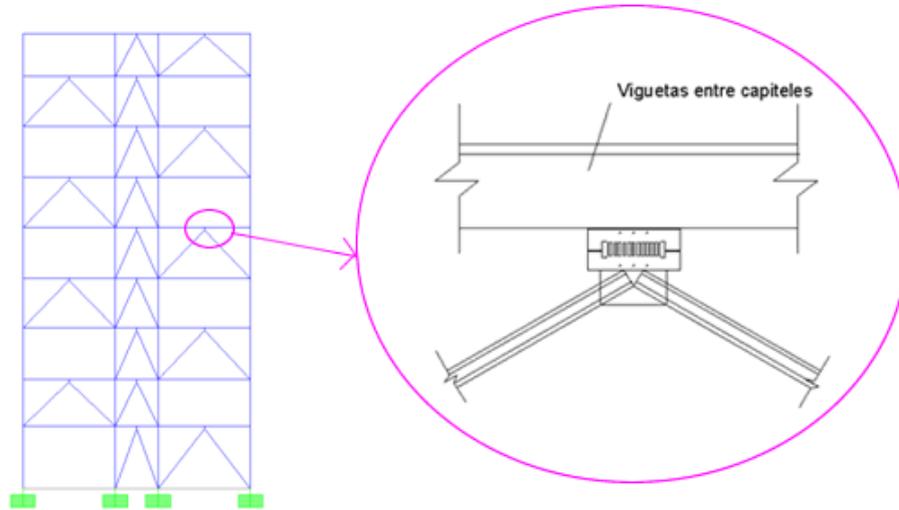


Figura 4.2 Disposición propuesta de los disipadores

Por otro lado, con la información contenida en los planos estructurales y los estudios de patología previamente efectuados sobre la estructura bajo análisis, se estimaron las curvas de esfuerzo vs. deformación para el acero y el concreto presentadas en la Figura 4.3.

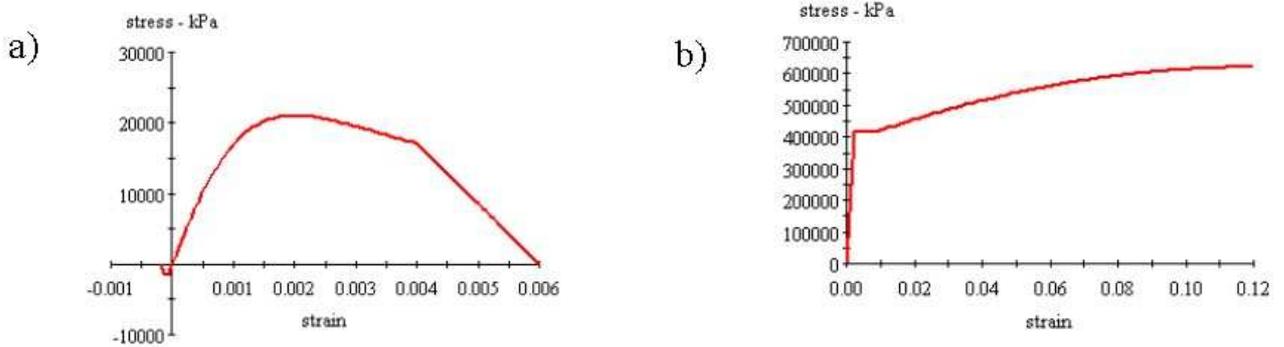


Figura 4.3 Curvas esfuerzo deformación para el a) Concreto b) Acero

Además, para poder realizar análisis no lineales, se calculó el diagrama momento-giro para cada una de las secciones de vigas y columnas, así como los diagramas de interacción para cada columna. Dichos diagramas se estimaron del programa de análisis de fibras XTRACT® en su versión académica, y luego estas características fueron ingresadas a SAP2000® como rótulas plásticas para tener en cuenta el comportamiento no lineal de la estructura. En la figura 4.4 se presenta un esquema del pórtico analizado y la sección transversal de las columnas del primer piso. Así mismo en la Figura 4.5 se presentan diagramas típicos de momento vs. rotación y así como el diagrama de interacción.

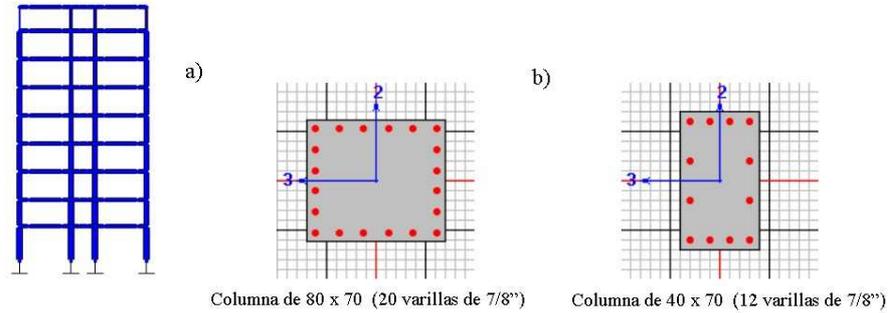


Figura 4.4 a) Esquema del pórtico plano analizado b) Sección transversal de las columnas del primer piso del pórtico

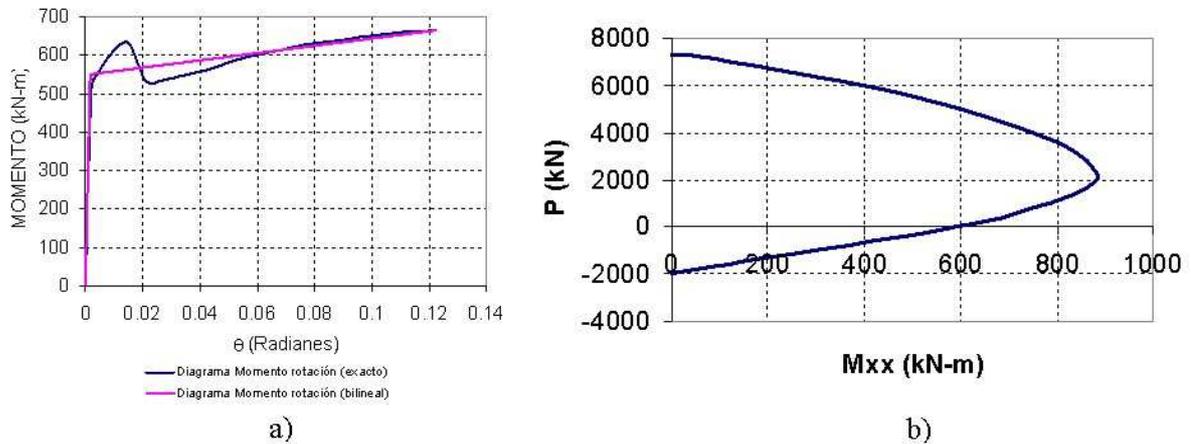


Figura 4.5 a) Diagrama Momento rotación b) Diagrama de interacción para momentos alrededor del eje fuerte

La estructura con y sin la rehabilitación fue sometida a una serie de ocho (8) señales, cuatro (4) de ellas con efectos de sitio y las restantes asimiladas a un estrato de roca superficial, que es el correspondiente a la localización real de la edificación. Los sismos usados en el análisis fueron denominados *Tauramena*, *México*, *Corralitos* y *Valparaíso*. Estos sismos han sido utilizados para el cálculo de la respuesta sísmica a nivel local en diversos sitios de la ciudad de Bogotá y tienen en cuenta las amplitudes y los contenidos de frecuencia de sismos de origen regional, cercano y lejano [*GeoIngeniería Ltda, 2001*]. En la Figura 4.6 se presentan las ocho (8) señales de estudio. El análisis realizado a la estructura con los sismos mencionados fue de tipo histórico (*time-history*), involucrando no linealidad de los materiales y la respuesta se obtuvo mediante integración directa. Para cada sismo se analizó la estructura con y sin disipadores, obteniendo información importante de la respuesta de la edificación, como son las fuerzas internas, las derivadas, las rotaciones en los nudos y los ciclos histeréticos en los disipadores.

Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica
IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción - Chile

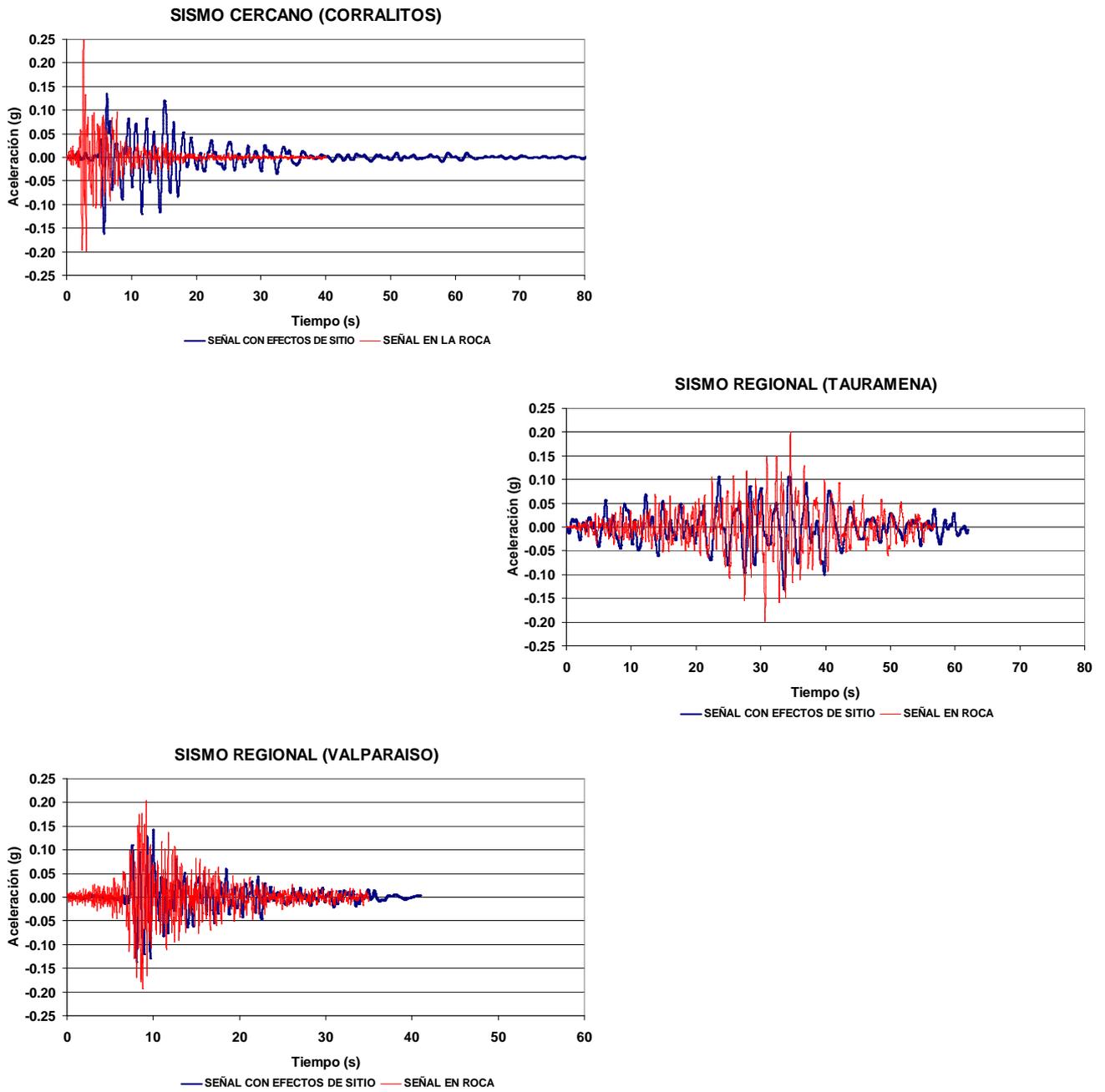


Figura 4.6 Señales usadas para el análisis de la estructura bajo estudio

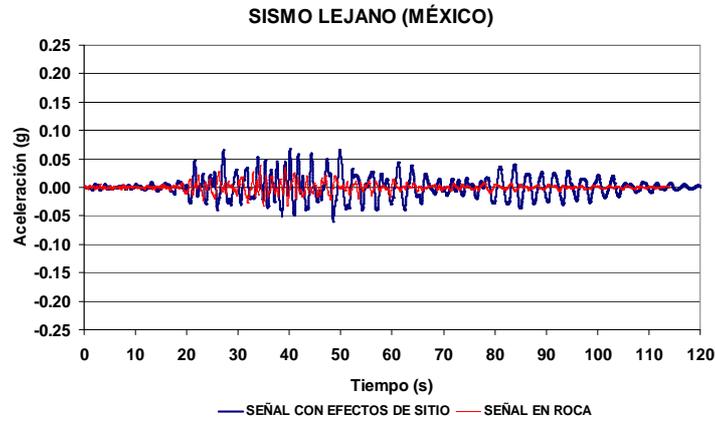


Figura 4.6 (continuación) Señales usadas para el análisis de la estructura bajo estudio

Se obtuvo resultados diversos en los análisis realizados dependiendo del sismo analizado. No obstante, y a nivel general, se observó que la rehabilitación generó reducciones importantes en las derivas de entre piso, que implicarían una disminución del daño de los elementos estructurales y no estructurales. En la Figura 4.7 se muestran la evolución de las derivas (en porcentaje de la altura) en función del tiempo de uno de los sismos analizados. En esta última figura se observa una reducción importante de la deriva pico, pasando de 0,95% sin rehabilitación a 0,29% con rehabilitación. Esta respuesta tiene la misma tendencia en los cuatro sismos analizados tal como se observa en la Tabla 4.1, en donde se resumen las derivas máximas alcanzadas por la estructura para las señales analizadas. Otro aspecto notable de la rehabilitación estructural es la reducción de los períodos fundamentales de vibración, lo cual es consecuencia natural de un aumento en la rigidez de la edificación.

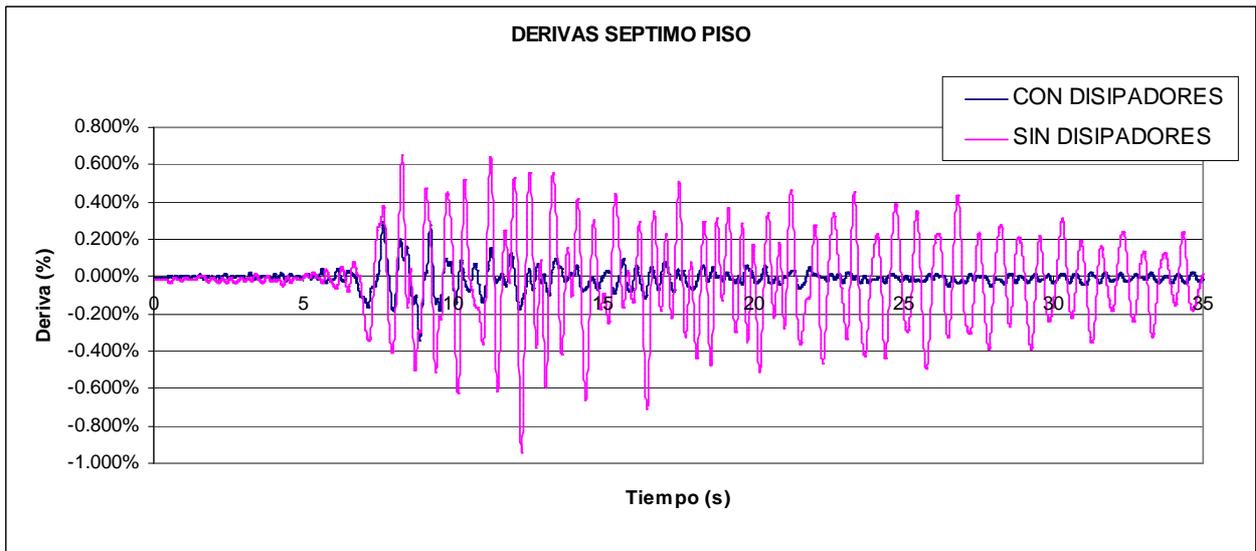


Figura 4.7 Derivas de entrepiso con y sin rehabilitación, sismo de Valparaíso

TABLA 4.1 Comparación de derivas de entrepiso máximas para los sismos de análisis

Sismo	Sin Rehabilitación	Rehabilitada con disipadores de energía
<i>Corralitos</i>	1.20 %	0.53 %
<i>Ciudad de México</i>	0.53 %	0.27 %
<i>Valparaíso</i>	0.95 %	0.29 %
<i>Tauramena</i>	1.33 %	0.99 %

Adicionalmente se analizó la secuencia de formación de rótulas plásticas en los elementos estructurales. En la mayoría de los casos se observó que la rehabilitación con disipadores de energía trajo como consecuencia una disminución notable de la rotulación de los nudos viga-columna. Esto implica que hay un incremento en el nivel de seguridad de la edificación, pues hay menos elementos principales comprometidos. En la Figura 4.8 se muestran los estados finales para uno de los sismos de análisis para la estructura con y sin la rehabilitación. Es clara la reducción de rótulas plásticas generadas en los elementos estructurales de casi todos los niveles, concentrando la rotulación en los disipadores de energía (Figura 4.8b). Cabe anotar que para casos como el del sismo de *Tauramena*, el daño en la edificación es tan severo que la rehabilitación solo sirve para retrasar el daño de los elementos unos segundos, debido a la severidad del sismo. Además, es necesario mencionar que aún en casos en que se considera exitosa la rehabilitación, es necesario reforzar algunos elementos estructurales, aunque claramente el número de elementos a reforzar es sustancialmente inferior a los que deberían reforzarse si no se implementara la rehabilitación.

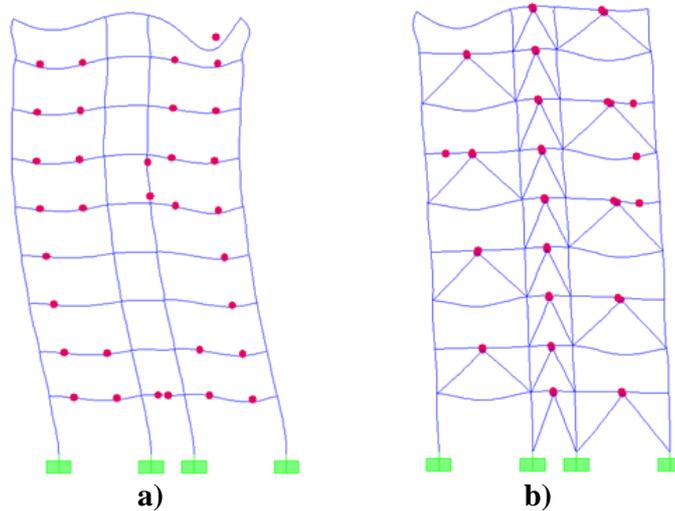


Figura 4.8 Estado de la edificación al final del de un sismo regional a) Sin Rehabilitación b) Con rehabilitación

El análisis de las fuerzas internas de los elementos con y sin la rehabilitación para los distintos sismos es consistente con los resultados mencionados anteriormente, pues se reducen de manera importante en casi todos los casos. Más concretamente, las reducciones que pueden destacarse se dan en las columnas, tanto

para momento como para cortante. En las vigas se presentan reducciones en los momentos, pero se generan aumentos en el cortante de algunas de ellas, así como en los capiteles.

El comportamiento de los disipadores fue el esperado, entrando a ciclos histeréticos bien definidos y estables. En la figura 4.9 se muestra el ciclo histerético para uno de los disipadores sometido a uno de los sismos analizados. En este caso se nota que el disipador pasa al rango inelástico constantemente, condición que origina la disipación de energía. Cabe anotar que dada la naturaleza de este tipo de dispositivos (dependientes del desplazamiento relativo) es necesario colocarlos en lugares en donde se garanticen desplazamientos suficientes para que puedan funcionar.

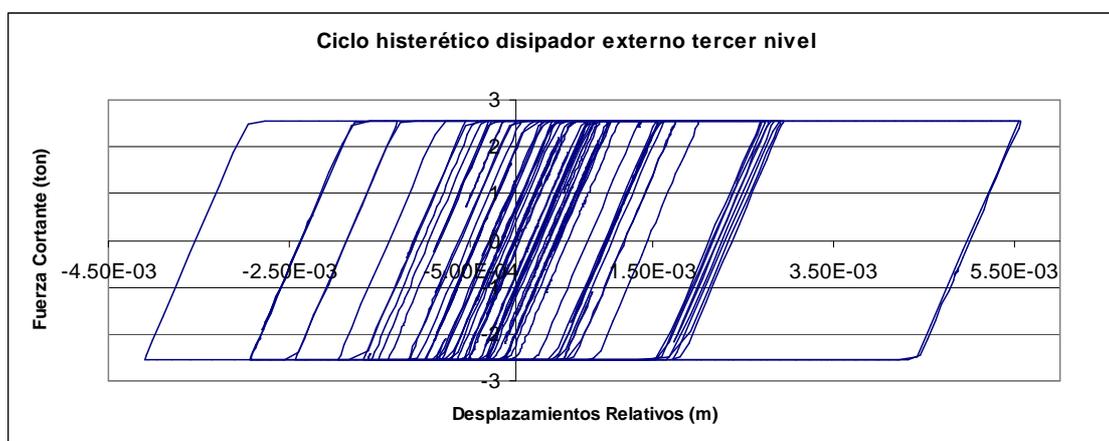


Figura 4.9 Ciclo histerético de un disipador (sismo Regional)

5. CONCLUSIONES

Con base en el estudio realizado, se plantean las siguientes conclusiones generales:

- La rehabilitación mediante disipadores de energía histeréticos metálicos es efectiva dependiendo de la forma de la estructura y el sismo de análisis.
- A nivel de reducción de derivas, la rehabilitación presenta un comportamiento satisfactorio. En todos los casos la deriva máxima se disminuyó a menos del 0,99% de la altura del entrepiso, lo que satisface los requerimientos de la mayoría de los códigos de diseño.
- Las fuerzas internas en los elementos disminuyeron con las rehabilitaciones para los efectos de corte y momento en columnas, y momento en vigas y capiteles. Sólo para corte en las vigas se presentaron algunos aumentos importantes en la magnitud de la fuerza al igual que en algunas columnas en donde se incrementó la fuerza axial actuante. Por esta razón, en dado caso que se rehabilite una edificación con disipadores de energía pasivos metálicos e histeréticos se deben

reforzar algunos elementos principales. No obstante, si no se efectuara la rehabilitación con disipadores, se tendrían que reforzar una gran cantidad de elementos estructurales.

REFERENCIAS

- Aiken, Ian D (1996). *Passive Energy Dissipation - Hardware and Applications*. Proceedings, Los Angeles County and Seasc Symposium on Passive Energy Dissipation Systems for new and Existing Buildings, Los Angeles.
- GeoIngeniería Ltda. (2001). *Asesoría Técnica y Sismológica Para La Evaluación y Reforzamiento Sísmico del Edificio de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá*. Bogotá.
- Hanson, Robert D. y Tsu, Soong (2001). *Seismic Design with Supplemental Energy Dissipation Devices*. MNO-8, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Kunisue, A., Koshika, N., Kurokawa, Y., et al (2000). *Retrofitting Method Of Existing Reinforced Concrete Buildings using Elasto-Plastic Steel Dampers*. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- Charney, Finley y Advanced Structural Concepts . NONLIN v.6.01 (2004). *Educational program for learning the concepts of Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. Colorado, USA.
- Reyes, Juan C (2001). *Modelamiento Sísmico no lineal de estructuras con disipadores de energía*. Tesis de Magíster. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
- Computers and Structures, Inc. (2003) SAP2000 Nonlinear v.8.1.2. *Structural Analysis Program*. Berkeley, CA, USA.
- Wada, A., Huang, Y.H., y Iwata, M (2000). *Passive Damping Technology for Buildings in Japan*. Progress in Structural Engineering and Materials. Wiley Interscience, London. Volume 2, Issue 3. pp 335-350.
- Imbsen Software Systems (20004) XTRACT v.3.0.2. *Cross-sectional Structural Analysis of Components*. Sacramento, CA USA.
- Murakawa, H., Ueda, Y. and Xiang, D. (1995). Effect of fluid force acting on colliding body upon damage given to offshore structures. *Journal of Constructional Steel Research* **33:3**, 259-281.