

# ANÁLISIS INELÁSTICO Y CONTROL DE LA RESPUESTA SISMICA DE EDIFICIOS UTILIZANDO DISIPADORES DE ENERGIA

**Ing. Roberto Morales Morales**

Rector de la Universidad Nacional de Ingeniería  
Post Grado UNI, MEXICO y JAPON

**Ing. Ricardo Oviedo Sarmiento**

Especialización Ing. Sismorresistente - UNI  
Maestría Ing. Estructural – UNI

**Palabras Clave:** Análisis Inelástico, Diseño Sismorresistente, Edificios, Disipadores de Energía.

## RESUMEN

*El presente trabajo de investigación se sitúa en el ámbito de edificios sismorresistentes con disipadores de energía. Se realiza el análisis dinámico inelástico y se evalúa el comportamiento inelástico de un edificio tridimensional de concreto armado de 109.66 m de altura total. Para lo cual se empleó el programa de computo SAP2000 Nonlinear versión 8.2.5 (Structural Analysis Program), desarrollado por Computers and Structures, Inc. - California (1984-2003) (1). Las secciones de los elementos con sus respectivas áreas de acero son tomadas en consideración para la determinación de las rótulas plásticas. Se utilizó el registro sísmico de octubre de 1966 y la aceleración sísmica se escaló a 400 gals para conocer la respuesta inelástica de la estructura.*

*Luego se realiza el diseño de los disipadores de energía a ser incorporados en la estructura, estos se adicionan al modelo, el se analiza y se evalúa su comportamiento con los disipadores de energía de fluido viscoso. Este sistema puede ser empleado para poder adicionarle un amortiguamiento adicional al sistema. El sistema disipador puede limitar las fuerzas horizontales actuantes en la estructura a valores admisibles, con lo que se lograría aprovechar la capacidad resistente de los elementos estructurales y mitigando su daño ante un evento sísmico.*

*Finalmente, se realiza una comparación de los resultados de la estructura con y sin la incorporación de disipadores de energía; incluyendo el mecanismo de formación de rótulas plásticas. Se presentan la fuerza y la deformación que toma el disipador. Así como también entre realiza una evaluación de la energía disipada, energía cinética y la energía de entrada.*

## 1. INTRODUCCION

El propósito de las previsiones sísmicas es la de primeramente evitar grandes daños estructurales, pérdidas de vidas humanas y mantener el funcionamiento de la estructura. Esto se debe al carácter económico: una estructura dúctil presenta aceleraciones absolutas inferiores y también esfuerzos menores a las producidas en comportamiento lineal y elástico y conduce a secciones de menor dimensión.

La energía total introducida por el sismo a la estructura  $E_i$ , puede ser absorbida por la suma de la energía cinética  $E_k$ , energía de deformación elástica  $E_{de}$ , energía disipada a través de deformaciones plásticas  $E_h$ , y amortiguamiento viscoso equivalente  $E_v$ . La ecuación de energía es la siguiente:

$$E_i = E_k + E_{de} + E_h + E_v \quad (1)$$

La energía de vibración elástica es la suma de la energía cinética y la energía de deformación elástica. Si se supone que para una estructura la energía de entrada  $E_i$  tiene un valor constante, para lograr un diseño sismorresistente económico será necesario en la ecuación anterior disipar parte de

la energía total introducida a través de un comportamiento inelástico, es decir, amortiguamiento viscoso  $E_v$  o histerético  $E_h$ , o una combinación de ambos (2).

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo fundamental mostrar el comportamiento dinámico de estructuras con disipadores viscosos de energía, los cuales estarán unidos a la estructura principal. El disipador de energía se diseña para formar parte de un sistema sismorresistente dual no estándar, formada por una estructura principal flexible, la cual soporta las acciones gravitatorias, y por un sistema que se concentra en el proceso disipativo y del que forman parte los disipadores de energía.

## 2. REGISTRO SISMICO CONSIDERADO

En el análisis inelástico la onda sísmica es un parámetro importante. Se realizó el análisis dinámico inelástico del edificio considerando el siguiente registro sísmico de Lima-Perú, 17 octubre de 1966, componente N08E, con una aceleración máxima 269.34 gals.

El gráfico de este registro sísmico se muestra en la figura 1, habiéndose escogido la componente que presenta la máxima aceleración en la base.

Debido a la gran cantidad de pasos de un registro sísmico completo, lo cual genera mucho tiempo y espacio de cómputo, se ha considerado un registro con una duración de 15 segundos, el cual se muestra en la figura 2. El tramo fue escogido de tal manera que la aceleración máxima del sismo esté contenida en el registro parcial y que la respuesta elástica de los registros completo y parcial sea similar. Para lo cual se obtuvieron los espectros de respuesta de velocidad de ambos registros, así mismo se obtuvieron los espectros de respuesta de aceleración, observándose una respuesta muy aproximada en el tiempo.

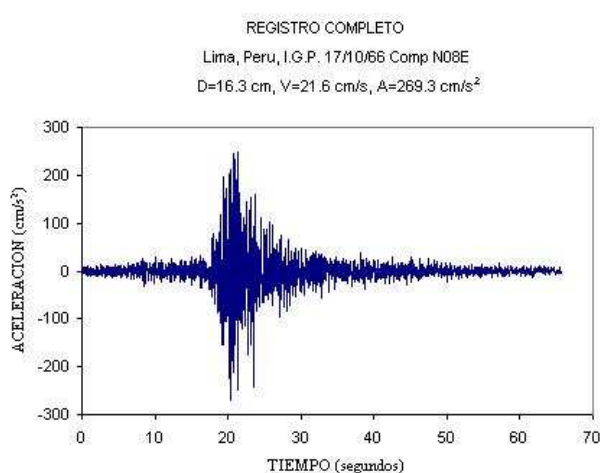


Figura 1 REGISTRO SISMICO COMPLETO

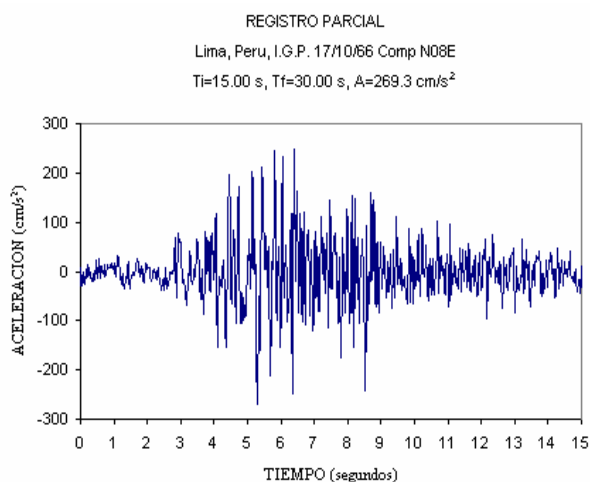


Figura 2 REGISTRO SISMICOPARCIAL

## 3. PROCEDIMIENTO Y LIMITACION

Normalmente los edificios típicos tienen un amortiguamiento interno estructural del 5% del crítico. Un óptimo rendimiento de un edificio con disipadores de fluido viscoso puede tener un amortiguamiento adicional en el rango del 20 al 25% del crítico (3). Experimentos con modelos de edificios han indicado mejoras en su comportamiento con amortiguamientos de hasta el 50% del crítico, pero su desventaja son los altos costos (4).

La magnitud del amortiguamiento adicional a la estructura para el control de la respuesta sísmica en estructuras está usualmente en el rango del 5 al 45% del amortiguamiento crítico. Este es un rango bastante amplio y varía con el tipo de la estructura y la excitación (5). Obviamente la cantidad de amortiguamiento seleccionado está bajo la responsabilidad del ingeniero estructural.

Existen niveles de amortiguamientos generalizados de proyectos previos localizados en suelo blando (6). Al edificio analizado se decidió adicionarle un amortiguamiento adicional de 15% del crítico, por ser una estructura alta.

#### 4. SELECCIÓN DEL TIPO DE DISIPADOR

Los disipadores de fluido viscoso tienen la habilidad de reducir simultáneamente los esfuerzos y las deflexiones de la estructura. Esto es debido a que los disipadores de fluido varían su fuerza solamente con la velocidad, la cual provee una respuesta que es inherentemente fuera de fase con los esfuerzos debido a la flexibilidad de la estructura. Otros disipadores pueden normalmente ser clasificados como hysteréticos, donde una fuerza de amortiguamiento es generada bajo una deflexión, o los viscoelásticos que son disipadores con un complejo resorte combinado con un amortiguamiento (7).

Los disipadores no fluidos disminuirán las deflexiones en la estructura pero al mismo tiempo incrementan los esfuerzos en las columnas. Los esfuerzos en las columnas tienen su máximo cuando el edificio llega a su deformación máxima. Si se adiciona un disipador de fluido viscoso, la fuerza de amortiguamiento se reduce a cero en este punto de máxima deformación. Esto es debido a que la velocidad del disipador se torna cero en este punto (8).

Se utilizaron los disipadores de fluido viscoso (figura 3 y 4), los cuales consisten en un pistón de acero con una cabeza de bronce con orificios y un acumulador el cual está lleno de aceite de silicona. El flujo del orificio es compensado por un termostato pasivo bi-metálico que permite la operación del dispositivo a un rango de temperatura de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La configuración del orificio, la construcción mecánica, el fluido y el termostato utilizado fue utilizada en una aplicación clasificada del Stealth Bomber B-2 de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (9).

La relación fuerza/velocidad de estos dispositivos puede ser caracterizado por  $F=CV^n$ , donde  $F$  es la fuerza de salida,  $V$  es la velocidad relativa a lo largo del disipador,  $C$  es la constante determinada por el diámetro del disipador y el área del orificio, y  $n$  es una constante que puede tomar valores desde 0.10 a 1.95 (10).

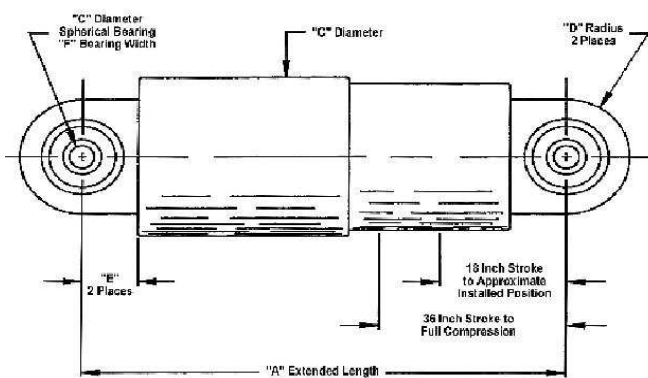


Figura 3 VISTA EXTERIOR DEL DISIPADOR

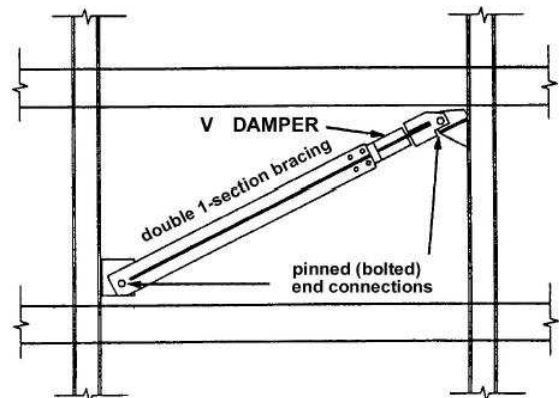


Figura 4 DETALLE DE LA INSTALACION

#### 5 ESTRUCTURA A EVALUAR

Para el presente trabajo de investigación se escogió una estructura tridimensional de concreto armado ya construida (Figura 5), de tal manera que al realizar el análisis dinámico tiempo historia inelástico de la estructura. La finalidad es reflejar resultados más reales que la de realizar un análisis de una estructura ideal; además, las características y las geometría de los elementos estructurales son típicas en lo referente al diseño y construcción empleados en el Perú. El edificio analizado estará sujeto a un registro sísmico de aceleración peruano. Se normalizo el registro

sísmico a un valor máximo de aceleración de 400 gals.

El edificio analizado se encuentra ubicado en la cuadra 13 de la avenida Arenales, distrito de Jesús Maria, en el departamento de Lima - Perú.

La estructura de concreto armado tiene 31 niveles y esta compuesta de pórticos y muros de corte. Comprende 03 niveles de sótano, 03 niveles para locales comerciales, un nivel tanque, un nivel de techo y 23 pisos típicos, estos últimos similares. La altura total del edificio es de 109.66 m.

El análisis dinámico sísmico inelástico con la inclusión de los disipadores de energía fue llevado a cabo con el programa de análisis estructural tridimensional inelástico SAP2000 v.8.2.5-2003 (1). El registro parcial de octubre de 1966 con 15 segundos de duración fue utilizado para el análisis de la respuesta sísmica, con una aceleración máxima escalada de 400.00 gals.

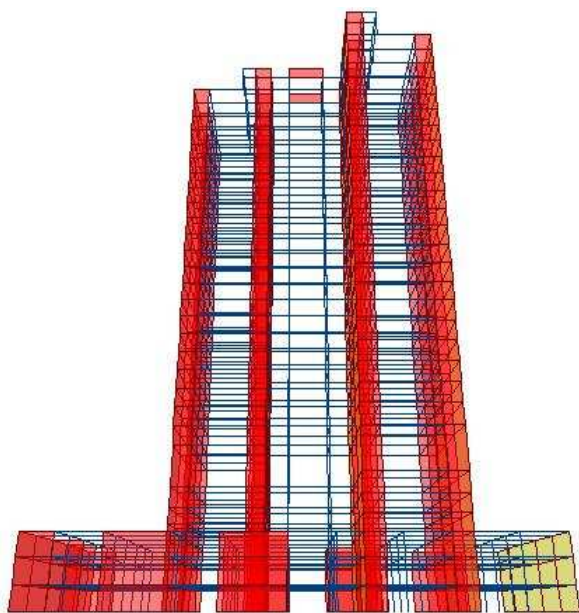


Figura 5 EDIFICIO INICIAL

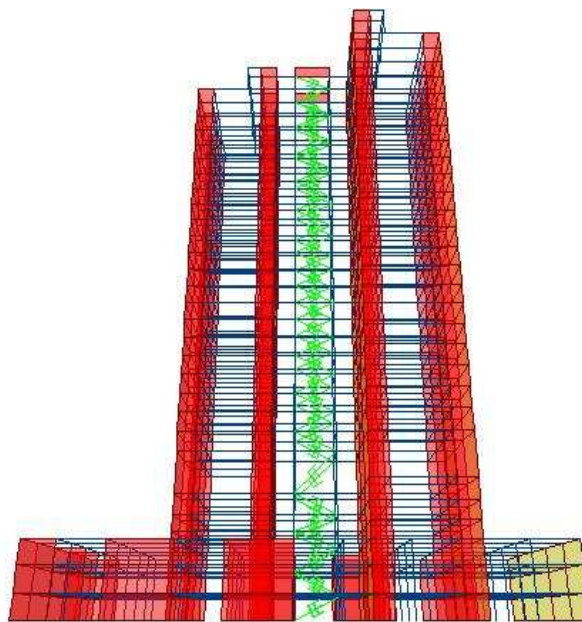


Figura 6 EDIFICIO CON DISIPADORES

## 6. COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

El edificio analizado es más flexible en el eje X, por lo tanto presenta una mayor deformación y período en ese sentido. Por ese motivo se colocaran los dispositivos disipadores de energía en ese sentido, con una cantidad de 02 por nivel, dando un total de 60 unidades, el detalle de la instalación se muestra en la figura 6.

### Efectos en las Fuerzas Cortantes

Del análisis considerando los disipadores de energía se comparan las respuestas para el nivel de aceleración del sismo amplificado a 400 gals. Esto con el objetivo conocer la respuesta de la estructura ante eventos sísmicos severos. Los resultados en el eje X, se presentan en las figura 7.

Se presentan las variaciones de las fuerzas cortantes en cada nivel del edificio sometido a la aceleración en la base, donde se observa que parte de la fuerza actuante es asumida por los disipadores y parte disipada por el comportamiento inelástico. Se aprecia la variación de la fuerza asumida por los disipadores la cual no es constante en la altura. Se reduce el cortante en un promedio de 25 %.

Ahora se discutirá la respuesta inelástica en el tiempo, para lo cual se presenta la figura 8 correspondiente a la respuesta tiempo-historia para el sismo utilizado en el eje X. Se presentan las variaciones de los cortantes de entrepiso en un nivel intermedio (nivel 10). Donde se puede observar que la variación en las fuerzas es debido a que los disipadores absorben parte de esa fuerza y la otra porción de la fuerza es disipada por el comportamiento inelástico del sistema.

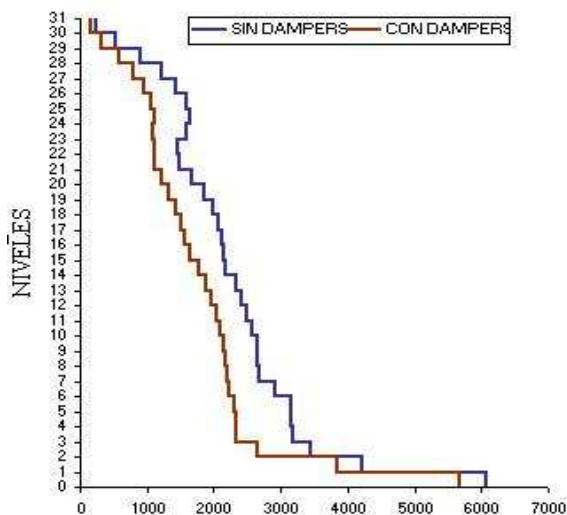


Figura 7 CORTANTES INELASTICAS DE ENTREPISO (t)

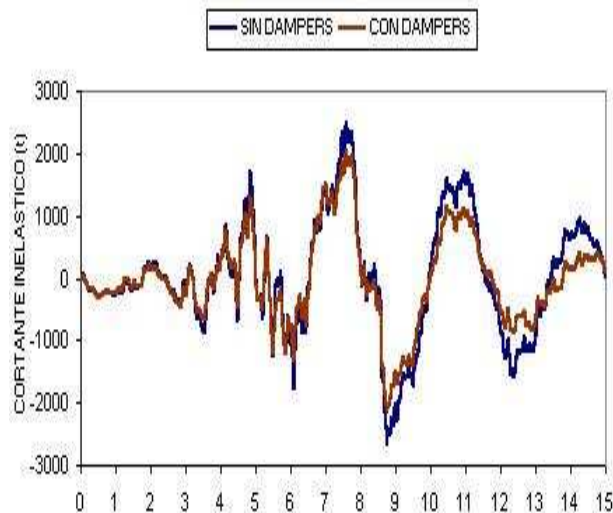


Figura 8 CORTANTE EN EL TIEMPO (s)

### Efectos en los periodos

Se realizó un análisis tridimensional modal de la estructura obteniéndose los siguientes periodos, los cuales son mostrados en la tabla 1. El primer modo de la estructura es en el eje X, el segundo en el eje Y, y el tercer modo es el rotacional. El comportamiento en la dirección de los disipadores se presenta una reducción importante del primer modo, pero también influye en los demás modos debido a que es una estructura tridimensional que tiene una torsión importante. Con los disipadores se reducen los periodos en un promedio de 60 %.

Modos de Vibración	Edificio Analizado Sismo 17/10/66 SIN DISIPADORES	Edificio Analizado Sismo 17/10/66 CON DISIPADORES
1er Modo	3.2543	2.0333
2do Modo	2.2756	0.9119
3er Modo	1.6211	0.5343
4to Modo	0.8693	0.4302
5to Modo	0.4768	0.2500
6to Modo	0.4007	0.1445
7mo Modo	0.3506	0.0942
8vo Modo	0.2295	0.0682
9no Modo	0.1980	0.0645

Tabla 1 MODOS Y PERIODOS DE LA ESTRUCTURA

### Efecto en el Desplazamiento

Para la aceleración considerada, se han comparado los desplazamientos máximos positivos en el eje X, donde se puede observar una importante diferencia en los desplazamientos en relación a la altura, producto de la incorporación de los disipadores (figura 9). Se redujo en 21% el desplazamiento.

La variación del desplazamiento de entrepiso debido a un análisis detallado a cada intervalo de tiempo se puede observar en la figuras 10. Debido a que cada nivel de piso tiene una respuesta tiempo-historia de desplazamiento diferente y el edificio presenta varios niveles, no se presentaran todos. El nivel intermedio pertenece al piso 04 (nivel 10).

Se puede apreciar en las figuras presentadas una disminución del desplazamiento en el

tiempo con la inclusión de los disipadores de energía. Los disipadores han sido localizados solo en el sentido X, pero también trabajan en el sentido perpendicular, esto debido a la torsión importante en la estructura.

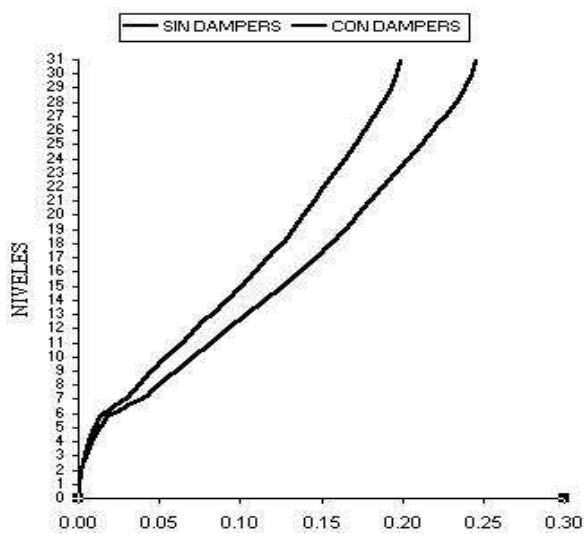


Figura 9 DESPLAZAMIENTO RELATIVO (m)

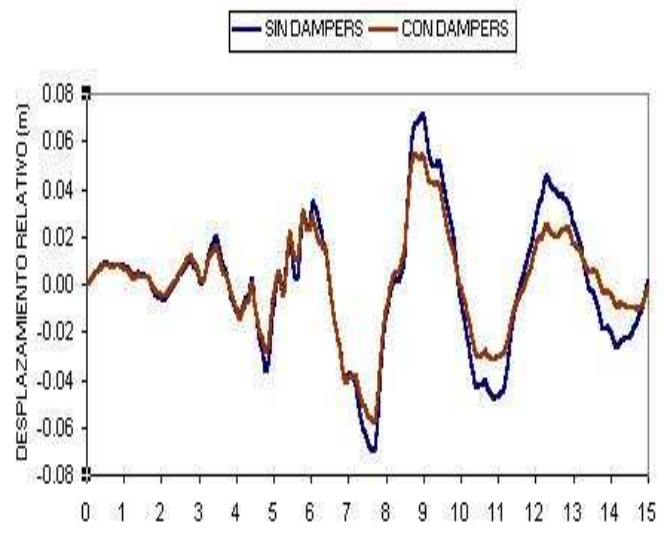


Figura 10 DESPLAZAMIENTO EN EL TIEMPO (s)

### Efecto en las Distorsiones

De las figuras 11 y 12, se puede observar que las distorsiones de entrepiso disminuyen de acuerdo al porcentaje de amortiguamiento diseñado y que fue adicionado a la estructura por medio de los disipadores de energía. De las figuras mostradas, se puede afirmar que la disminución de las distorsiones es en un 19 %.

Se ha podido observar que la variación en las distorsiones es debido a que los disipadores absorben parte de esa fuerza y la otra porción de la fuerza es disipada por el comportamiento inelástico del sistema.

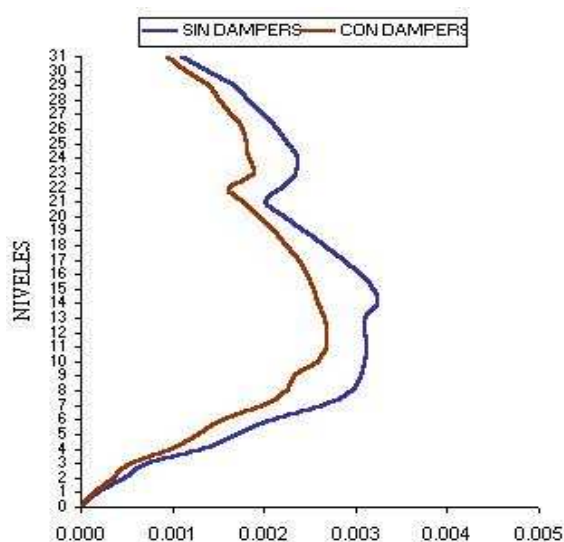


Figura 11 DISTORSIONES EDIFICIO INICIAL

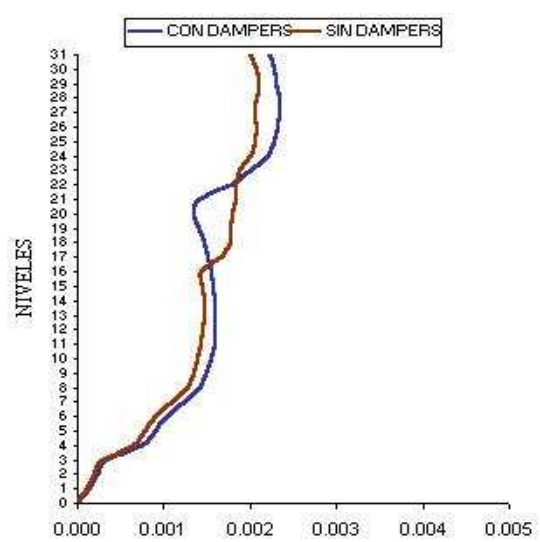


Figura 12 DISTORSIONES ON DISIPADORES

### Efecto en las Velocidades

Se puede observar en la figura 13, que cada nivel de piso tiene una respuesta tiempo-historia de velocidades diferente, las cuales son muy similares en forma a las del edificio inicial pero con la diferencia que las velocidades han disminuido en un 17 % en el eje X..

En la figura 14, se puede apreciar que las velocidades en el nivel mostrado de la estructura.

Se aprecia que los valores disminuyen en el tiempo y con un porcentaje similar al diseñado

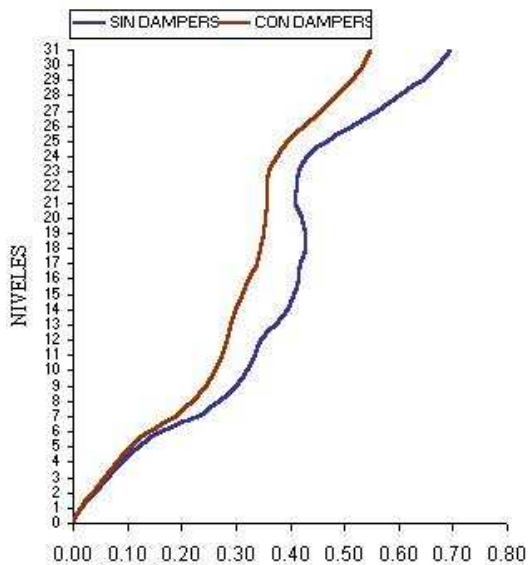


Figura 13 VELOCIDAD RELATIVA (m/s)

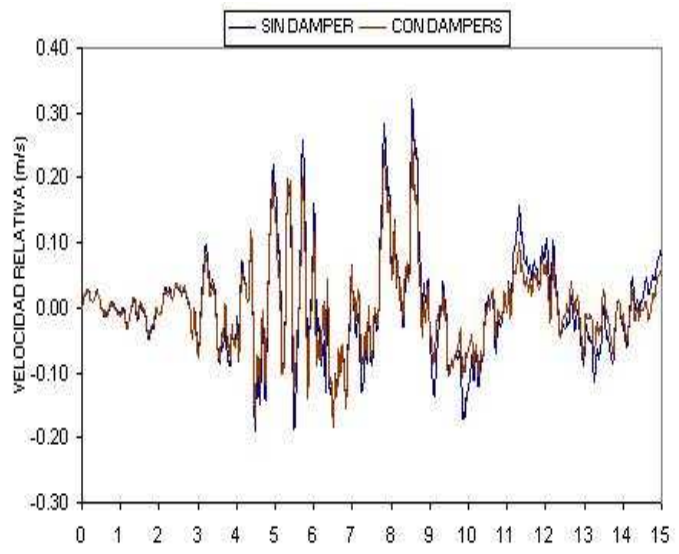


Figura 14 VELOCIDAD EN EL TIEMPO (m/s)

**Efecto en las Aceleraciones**

Las figuras 15 y 16, muestran la variación de las aceleraciones absolutas en el eje X, que se presentan a nivel de entrepiso. Los disipadores permiten una variación en las aceleraciones de entrepiso de una manera similar a cada nivel de aceleración. Los disipadores se diseñan para una fuerza, la cual varía con la velocidad, esto quiere decir que a mayor velocidad mayor fuerza disipativa, lo cual se puede observar en las figuras presentadas, para los distintos niveles de aceleración y a diversas alturas.

Se puede apreciar que las velocidades se disminuyen acorde con la distribución en altura y con un porcentaje de 23 %, similar al diseñado.

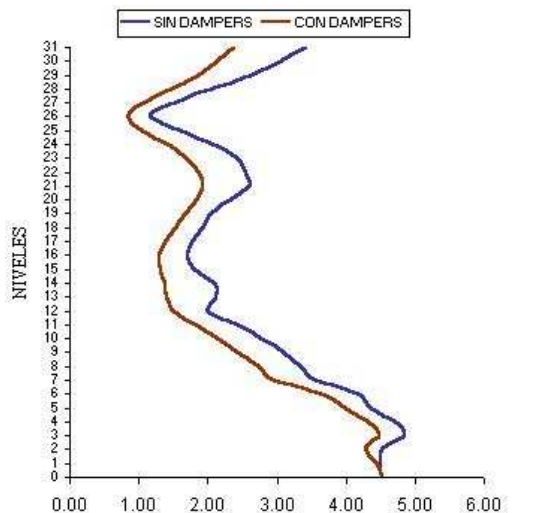


Figura 15 ACELERACION ABSOLUTA (m/s<sup>2</sup>)

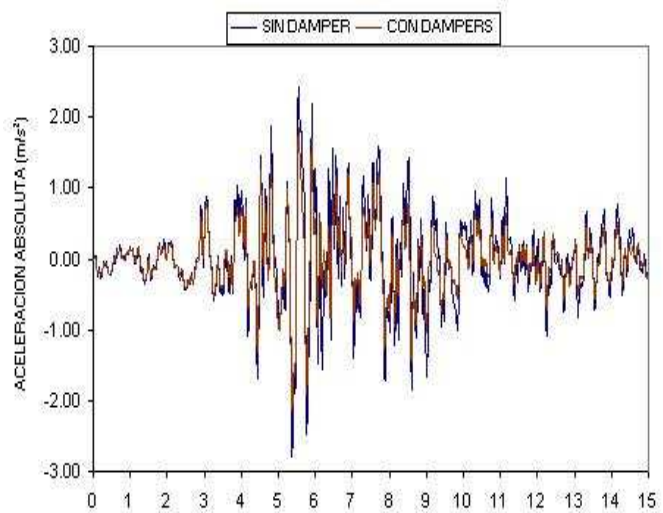


Figura 16 ACELERACION EN EL TIEMPO (m/s<sup>2</sup>)

**Fuerza Desarrollada por el Disipador**

Las figuras 17 y 18 muestra el comportamiento histerético del disipador, obteniéndose una fuerza variable con el tiempo y a un desplazamiento variable, el cual nos servirá para especificar los requerimientos de fabricación del disipador y permitir una variación para que no falle ante un evento sísmico. La forma de la curva histerética esta de acuerdo al modelo predefinido de Wen. Se muestra el comportamiento histerético no lineal de la fuerza desarrollada por el disipador en el nivel 10 y 20 respectivamente. En ambas figuras se observa un adecuado comportamiento del disipador

desarrollando una fuerza acorde a la diseñada.

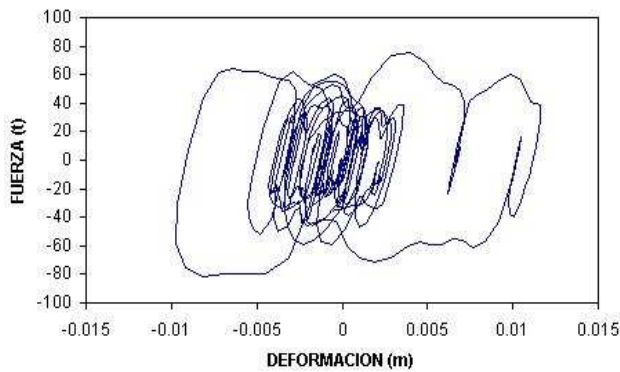


Figura 17 FUERZA-DEFORMACION (NIVEL 10)

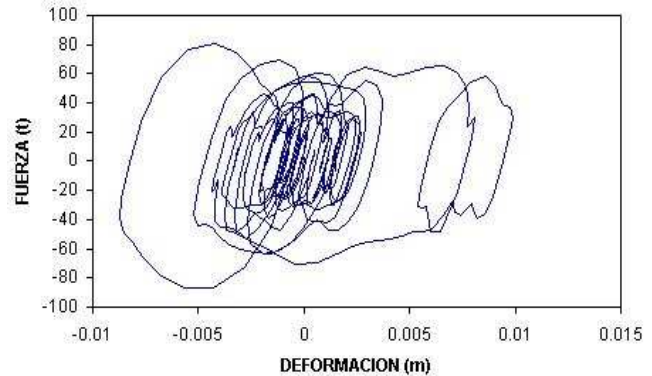


Figura 18 FUERZA-DEFORMACION (NIVEL 20)

### Balance Energético

Se evaluó la estructura mediante el software disponible bajo el enfoque del análisis dinámico, que permita conocer la energía almacenada y disipada en la estructura.

En las figuras 19 y 20, se presenta la energía del sismo y los distintos tipos de energía, tales como la Energía Kinética, Energía Potencial, de Amortiguamiento Modal y del Disipador. Se presentan estas energías para la estructura inicial y para la estructura con disipadores.

En los gráficos se presenta la energía de amortiguamiento modal, que fue especificada en 5% del amortiguamiento crítico. Esta energía es importante para compararla con la cantidad de la energía disipada por los disipadores de energía a utilizarse. Esto es importante por que la disipación de energía influye en el daño estructural.

Se puede advertir que la energía kinética y la energía potencial presentan un bajo porcentaje de la energía del sismo y son más importantes entre los 4.7 y los 10 segundos aproximadamente. Entonces la energía disipada por la estructura debido a la deformación plástica es de mayor significación que estas energías.

Se demuestra gráficamente la modificación del comportamiento estructural del sistema con la inclusión de los disipadores de energía. Se muestra la distribución de la energía de entrada en el tiempo. Los disipadores de energía, disipan una gran cantidad de la energía, dejando una parte a ser disipada por la acción inelástica de los elementos de concreto de la estructura.

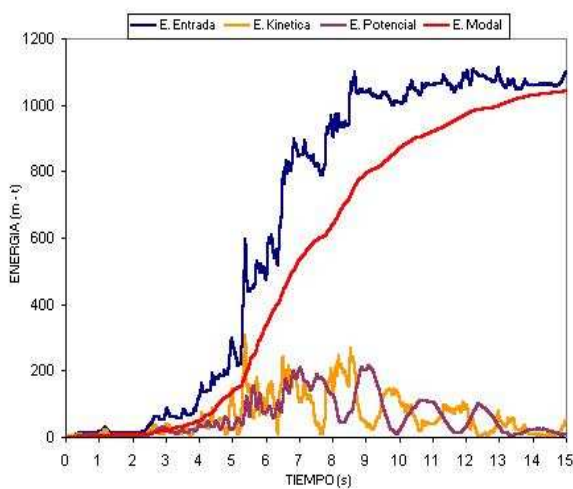


Figura 19 ENERGÍA EDIFICIO CON DISIPADORES

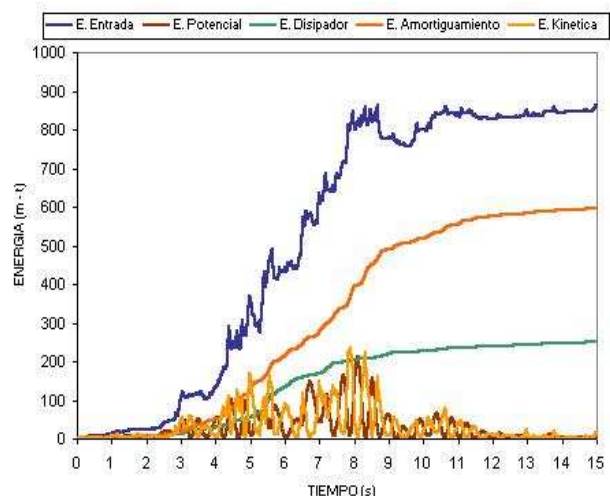


Figura 20 ENERGÍA EDIFICIO CON DISIPADORES

### Efecto en el Mecanismo de Formulación de Rotulas Plásticas

La disipación inelástica representa daño estructural, el cual es impredecible y es bastante detallado de especificar. La estructura disipa gran cantidad de la energía de entrada con los

disipadores de energía, los cuales son diseñados directamente para la disipación de energía y son más confiables para controlar el daño estructural.

El disipador permite una menor formación de rotulas plásticas, pero un incremento en la fuerza, por la disminución de la energía inelástica disipada.

El proceso de formación de rotulas plásticas para la aceleración máxima de 400 gals se presenta en las figuras 21 y 22. Se ha observado también que las rotulas plásticas han disminuido, debido a que los disipadores de energía permiten una menor formación de las rotulas plásticas en la estructura. Parte de la energía inelástica disipada por fluencia, es tomada por los disipadores.

Para este caso de la estructura con disipadores de energía. Estos influyen positivamente en el mecanismo de formación de rotulas plásticas, haciendo que el edificio analizado sometido a los niveles de aceleración mencionados es mas estable, y que la estructura no llegaría al colapso.

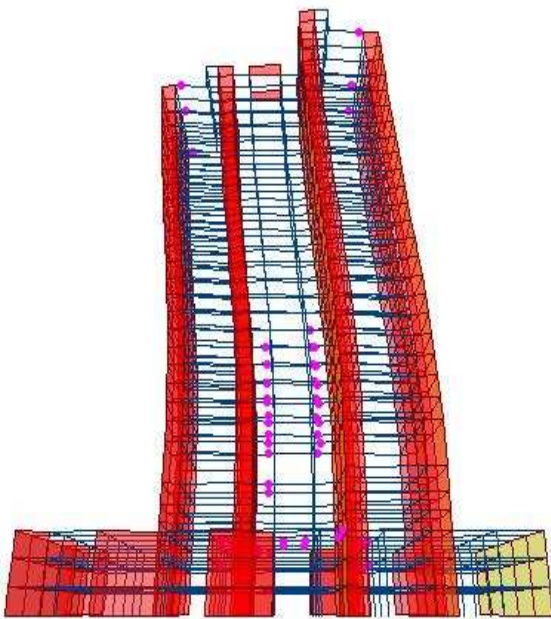


Figura 21 EDIFICIO ROTULADO INICIAL



Figura 22 EDIFICIO ROTULADO CON DISIPADORES

## 7. CONCLUSIONES

- La realización de un análisis inelástico nos da una mayor aproximación al comportamiento real de la estructura ante un evento sísmico; debido a que la respuesta tiempo historia y los esfuerzos en los elementos varían respecto al tiempo. El mecanismo de formación de las rotulas plásticas nos permite conocer las zonas mas vulnerables de la estructura y donde se debería poner mayor énfasis en el proceso de diseño o posible incorporación de mecanismos disipadores de energía.
- Se demuestra una modificación importante en el comportamiento estructural del edificio con los disipadores de energía. Según los resultados obtenidos se puede afirmar que para los niveles de aceleración la estructura desarrolla un mecanismo estable y la estructura no colapsaría ante sismos severos. Una significativa cantidad de energía de entrada es disipada por la acción inelástica de los elementos y una importante cantidad la disipan los disipadores de energía.
- Se concluye que las distorsiones no son lo único importante en el diseño. Los disipadores de energía no solo reducen las distorsiones, también influyen en la acción inelástica. Los disipadores de energía disminuyen la transmisión de aceleración y velocidad en altura en relación al nivel de amortiguamiento diseñado.

## 8. RECOMENDACIONES

- Se hace necesaria realizar estudios con una mayor cantidad de registros sísmicos y en otros tipos de estructuras, para determinar de una manera más precisa el comportamiento estructural con disipadores de energía.
- El uso del amortiguamiento suplementario por ser un método efectivo se recomienda para resistir la fuerza sísmica en las estructuras. El autor cree que los disipadores de energía será una de las principales soluciones para la protección sísmica del presente siglo.
- Se recomienda realizar investigaciones con otros tipos de disipadores de energía, tales como los viscoelásticos, por fricción, por fluencia de metales, etc. Con la finalidad de tener un mejor conocimiento su desempeño, ventajas y posibilidades de aplicación en el diseño sismorresistente de estructuras.

## 9. REFERENCIAS

01. COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. 2003. *"SAP2000 Version 8.2.5, A Computer Program for Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three Dimensional Structures"*, Berkeley, California, USA.
02. CAHIS, X. 2000. *"Desarrollo de un Nuevo Disipador de Energía para Diseño Sismorresistente. Análisis Numérico y Validación Experimental de su Comportamiento"*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. España.
03. AIKEN, I. 1998. *"Testing of Seismic Isolators and Dampers Considerations and Limitations"*, Proceedings, Structural Engineering World Congress, San Francisco, California. USA.
04. CONSTANTINOU, M., SYMANS, M., and TSOPELAS, P. 2002. *"Fluid Viscous Dampers in Applications of Seismic Energy Dissipation and Seismic Isolation"*, Proc. Of ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, San Francisco, CA, pp. 584-591. USA.
05. TAYLOR DEVICES, INC. 2003. *"Sample Technical Specifications for Viscous Damping Devices"*, Technical Paper for Design. North Tonawanda, NY. USA.
06. TAYLOR, D. 1999. *"Buildings: Design for Damping"*, Proceedings of the Boston Society of Civil Engineers, BSCES, Lecture Series, "Dynamics of Structures". USA.
07. CONSTANTINOU, M., and SYMANS, M. 1993. *"Seismic Response of Structures with Supplemental Damping"*, Journal of Structural Design of Tall Buildings, Vol. 2, pp. 93-132. USA.
08. CHANG, S., and MAKKRIS, N. 2000. *"Effect of Various Energy Dissipation Mechanisms in Suppressing Structural Response"*, 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
09. MIYAMOTO, H., and TAYLOR, D. 2001. *"Structural Control of Dynamic Blast Loading Using Fluid Viscous Dampers"*, Marr Shaffer & Miyamoto, Inc. Sacramento, California. USA.
10. KELLY, T. 2001. *"In-Structure Damping and Energy Dissipation"*, Design Guidelines Published by Holmes Consulting Group, Wellington. New Zealand.