

CONTROL DEL DAÑO SISMICO: DISIPADORES DE ENERGIA / CONCRETO ARMADO

Oviedo Sarmiento, Ricardo., Ing. Civil, Esp.

Docente, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad San Martín de Porres, roviedos@usmp.edu.pe

RESUMEN

Diversas aplicaciones de dispositivos disipadores de energía en edificios nuevos y existentes en los estados unidos y en Japón son el resultado de grandes esfuerzos para el desarrollo de los disipadores de energía. El incremento del uso de esta tecnología en estos países a originado una demanda en los códigos de diseño para especificar su utilización. El presente artículo mostrara las bondades de los disipadores de energía viscosos versus al reforzamiento con concreto armado. Esto es porque en los sistemas estructurales convencionales utilizados para resistir la fuerza sísmica en estructuras aporricadas se utiliza el aumento de la sección de la columna y/o la incorporación de placas; pero ambas soluciones tienden a incrementar la rigidez de la estructura y la fuerza sísmica. En un posterior artículo desarrollaremos los procedimientos de diseño según códigos americanos y se mostrara la necesidad de su incorporación a la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E-030.

ABSTRACT

Several applications of energy damper devices in new and old buildings in the United States and in Japan are the result of big efforts for the development of the energy dampers. The increase of the use of this technology in these countries has bring a demand in the design codes for specify their utilization. The present article shows the boundaries of the viscous energy dampers versus the strengthening with reinforced concrete. This is because in the conventional structural systems used for resist the seismic force in frame structures used the increase of the column section and/or the incorporation of shear walls; but both solutions increase the stiffness of the structure and the seismic force. In an article posterior we will develop the design procedures with the American codes and we will show the necessity of their incorporation to the Peruvian Code of Seismic Design E-030.

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta el sismo de diseño de 1966 amplificado a una aceleración máxima de 400 gals (figura 1). El diseño sismorresistente para la estructura es con elementos de concreto armado para brindarle a la estructura una rigidez tal que permita una distorsión del orden del 0.007, para una aceleración máxima con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años.

El objetivo del Diseño Sismorresistente con disipadores de energía viscosos es proveer un desempeño para una ocupación inmediata para un vento sísmico con un periodo de retorno de 475 años. El proyecto requería mantener los costos de construcción con los típicos códigos de construcción. Se utilizaron dispositivos disipadores viscosos de energía como sistemas resistentes a fuerzas laterales. Se desea comparar los resultados de costos y desempeño sísmico para ambos sistemas. Las guías del NEHRP (FEMA, 2000) fueron utilizadas para diseñar el proyecto, a partir de que es considerado un estado del arte el procedimiento de diseño sísmico de los disipadores de energía.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El proyecto esta localizado en Lima, Perú, la cual es una región con alta actividad sísmica. La estructura es de tres niveles, 648 m2m, de concreto armado. El techo es de losa aligerada de concreto armado de 20 cm, las vigas son de 20 x 35 en el transversal (eje X) y de 25 x 50 en el sentido longitudinal (eje Y). Las columnas son de 25 x50 y las placas son de 20 x 70. En la figura 2 se muestra una vista tridimensional de la estructura.

3. REGISTRO SÍSMICO UTILIZADO

Se consideró un registro sísmico completo para la realización de los análisis sísmicos con los disipadores de energía. Los datos del registro sísmico de Lima del 17 de Octubre de 1966 fueron proporcionados por Sistema Nacional de Datos Geofísicos del Instituto Geofísico del Perú. El registro sísmico seleccionado es uno de los más representativos y frecuentemente utilizado para diseño sísmico en Perú. Presenta una aceleración máxima de 269.3 cm/s², una velocidad de 21.6 cm/s y un desplazamiento de 16.6 cm. El grafico del acelerograma seleccionado se muestra en la figura 3 y su espectro de respuesta con amortiguaciones al 5, 10, 15 y 20% de amortiguamiento respectivamente son mostrados en la figura 1.

El registro sísmico completo tiene intervalos de tiempo de 0.02 s, y cuenta con un total de 3282 pasos, lo que nos da un tiempo total de duración de 65.4 s.

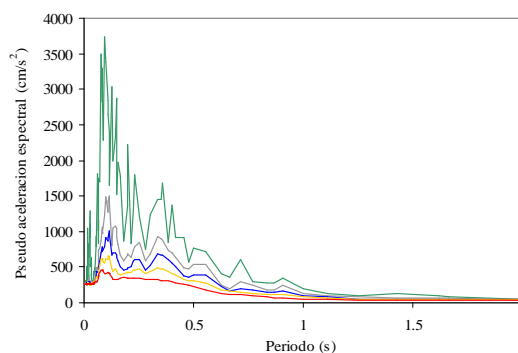


Figura 1. Espectros de aceleraciones

Tabla 1. Registro sísmico considerado

Fecha	Orientación	PGA	PGV	PGD
17/10/1966	N08E	-269.34	-21.6	-16.6

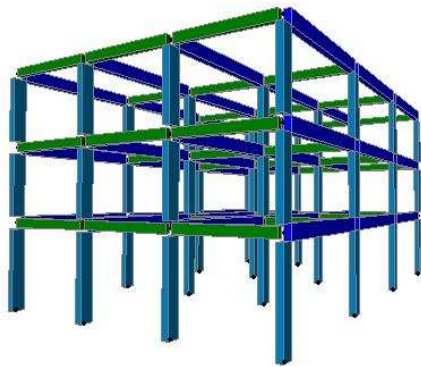


Figura 2 Vista tridimensional de la estructura aporticada

Tabla 2 Alturas, pesos y masas

NIVEL	ALTURA (m)	PESO (t)	MASA (t.s ² /m)
Nivel 03	3.00	118.5	12.08
Nivel 02	3.00	162.9	16.61
Nivel 01	3.50	164.2	16.74
TOTAL	9.50	445.6	45.43

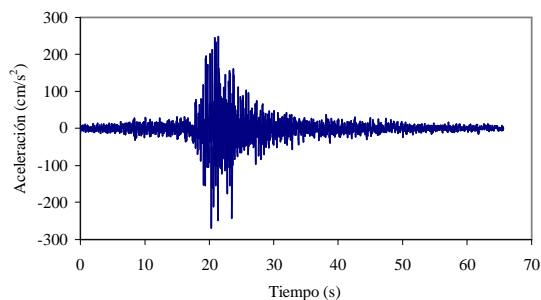


Figura 3. Registro sísmico de Lima del 17 de Octubre de 1966

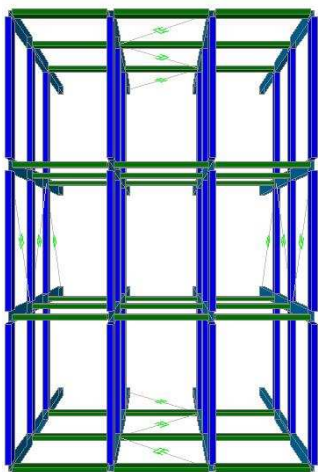


Figura 4 Vista en planta de la estructura

4. DISEÑO CON ELEMENTOS DE CONCRETO

Las ecuaciones La estructura fue diseñada con el incremento de la sección de los elementos de concreto armado para cumplir con las distorsiones de la norma peruana de diseño sismorresistente E030-2003, que establece una distorsión máxima de 0.007 para estructuras de concreto armado.

El criterio de distorsión es el criterio que controla el diseño en comparación al criterio por resistencia. Se realizó un análisis elástico tiempo historia lineal, para determinar los límites de desplazamiento de la estructura según los requerimientos de la norma. Los máximos desplazamientos de entrepiso y sus respectivas distorsiones se muestran en la tabla N. 6.

Luego de verificar el control de desplazamientos con el incremento de la sección de los elementos a la estructura, se realizó un análisis inelástico tiempo historia. Se presentaron algunas rotulas plásticas en las bases de las columnas y placas del primer nivel, y en las vigas de todos los niveles con una menor cantidad en las vigas del ultimo nivel, tal como lo muestra la figura N. 8 y. Las deformaciones encontradas brindaron límites de distorsiones aceptables de unos 0.007, que cumplen con las distorsiones máximas permisibles de la norma. El cortante basal de 242.45 t, puede causar daño no estructural a los equipamientos de piso e instalaciones diversas. Esta es la limitación del diseño convencional. Esta rigidez que brinda el aumento de las secciones de los elementos de concreto armado provee respuestas distantes a la respuesta elástica. Este sistema también produce grandes aceleraciones de entrepiso. Para esta aceleración sísmica, la alta frecuencia del sistema puede producir incluso una aceleración mayor y un incremento en las demandas sísmicas de los componentes no estructurales.

Tabla 3. Períodos y frecuencias con elementos de concreto

Modos	Período (s)	% Masa Participativa
Modo 1	0.720	87.257
Modo 2	0.499	33.972
Modo 3	0.465	54.860

5. DISEÑO CON DISIPADORES DE ENERGÍA VISCOSOS

La estructura fue entonces rediseñada utilizando disipadores de energía viscosos con la NEHRP 2000. El diseño de los disipadores de energía fue considerado para el control de los desplazamientos de la estructura de tal manera de permitir una ocupación inmediata después de ocurrido el evento sísmico de diseño. La figura 4 muestra las disposiciones de los disipadores de energía viscosos en la estructura.

Los disipadores de energía viscosos fueron diseñados para permitir un desempeño elástico de la estructura con la mínima aparición de rotulas plásticas en los elementos de concreto armado. Las propiedades de los disipadores de energía viscosos fueron seleccionadas basadas en una óptima reducción de los desplazamientos y fuerza de trabajo de los disipadores. La tabla 6 Muestra los resultados del análisis modal. Este incremento del periodo efectivamente brinda a la respuesta dinámica un menor rango de aceleración en el espectro de respuesta.

El modelo inelástico con la incorporación de disipadores viscosos de energía y con la formulación de rotulas plásticas en los elementos fue desarrollado en el programa SAP2000

v.10.0.1. Se utilizó el registro sísmico de 1966 escalado a 400 gals, compatible a un evento de 475 años de periodo de retorno, fue sintetizado por el Instituto Geofísico del Perú. Se utilizó el análisis inelástico tiempo historia con un procedimiento de aceleración lineal paso a paso.

El análisis inelástico tiempo historia muestra que todos los elementos de la estructura permanecieron en el rango elástico. El máximo desplazamiento de entrepiso es reducido en comparación al de la estructura con elementos de concreto armado; el cortante en la base es reducido; y la distorsión máxima de entrepiso también es reducida. La máxima fuerza por unidad del disipador viscoso es 8 t en el primer nivel del eje A. Estos resultados muestran que el daño estructural es eliminado y que el daño no estructural es significativamente reducido al adicionarle disipadores de energía a la estructura. La figura 6 muestra el diagrama fuerza-desplazamiento para el disipador de energía del primer nivel del eje A. Se muestra el efecto del exponente de amortiguamiento que fue de 0.5. La superficie del lazo histerético está entre una línea ovalada ($\alpha = 1.0$) y una rectangular ($\alpha < 0.1$). Se muestra la respuesta inelástica del disipador viscoso. La figura 6 muestra el cortante en la base en el tiempo de la estructura con placas de concreto armado con la estructura con disipadores viscoso de energía. Se aprecia una sustancial reducción del cortante en la base. Se puede apreciar una sustancial reducción del desplazamiento. Los disipadores de energía disipan la mayor cantidad de la energía sísmica de entrada.

Tabla 4. Características de los disipadores de energía

Disipadores	Coefficiente de Amortiguamiento	Exponente amortiguamiento	Rigidez
Fluido Viscoso	(t-s/m)		(t/m)
3er nivel	28.000	0.5	14000
2do nivel	28.000	0.5	14000
1er nivel	28.000	0.5	14000

Tabla 5. Períodos y frecuencias con disipadores de energía

Modos	Período (s)	% Masa Participativa
Modo 1	1.171	90.374
Modo 2	1.003	90.222
Modo 3	0.862	4.394

5. COMPARACION DE RESULTADOS

5.1 PERÍODOS Y FRECUENCIAS

De los resultados obtenidos con ambas alternativas en relación a los periodos, se puede mencionar que no existe modificación importante entre la estructura original y la estructura con disipadores de energía. Existiendo un aumento de rigidez en la estructura con incremento de sección en las columnas, la cual origina una disminución en el periodo del orden del 34%.

5.2 DISTORSIONES DE ENTREPISO

La figura N. 6 ilustra la comparación de las distorsiones entre los sistemas. Como se puede observar ambos sistemas cumplen con el límite de distorsión de la norma E-030. Además se aprecia una reducción considerable en las distorsiones de ambos sistemas en comparación con la estructura flexible inicial.

Tabla 6. Desplazamientos de entrepiso

	Estructura Rígida		Estructura con Disipadores VD	
	Eje X	Eje Y	Eje X	Eje Y
Desplazamiento 1er Nivel (cm)	1.430	1.488	1.484	1.319
Desplazamiento 2do Nivel (cm)	1.7630	1.4110	0.8050	0.6790
Desplazamiento 3er Nivel (cm)	1.1900	0.8000	0.3160	0.2980

Tabla 7. Distorsión de entrepiso

	Estructura Rígida		Estructura con Disipadores VD	
	Eje X	Eje Y	Eje X	Eje Y
Distorsión 1er Nivel	0.0041	0.0043	0.0042	0.0038
Distorsión 2do Nivel	0.0059	0.0047	0.0027	0.0023
Distorsión 3er Nivel	0.0040	0.0027	0.0011	0.0010

5.3 CORTANTES

Con la inclusión de los disipadores de energía en la estructura se han obtenido una cantidad importante de disminución en la fuerza cortante de entrepiso en relación a la estructura rigidizada con aumento de sección en las columnas, tal como lo muestra la tabla N 8.

Tabla 8. Cortantes totales de entrepiso

	Estructura Rígida	Estructura con Disipadores VD
Cortante (t) 1er Nivel	242.45	44.92
Cortante (t) 2do Nivel	185.88	36.32
Cortante (t) 3er Nivel	91.75	18.63

5.4 COMPORTAMIENTO DEL DISIPADOR

En el gráfico que se muestra a continuación se aprecia la fuerza desarrollada por el disipador de energía localizado en el primer nivel; llegando a desarrollar una fuerza de hasta 8 t y logrando alcanzar una deformación máxima para la sollicitación dada de 1.4 cm.

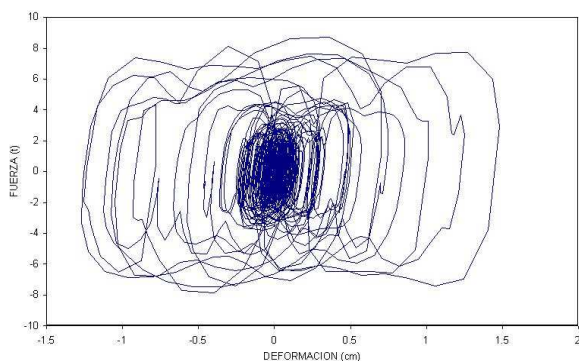


Figura 6. Curva histerética del dissipador

5.5. FORMACIÓN DE ROTULAS PLÁSTICAS

Se presenta la cantidad de rotulas plásticas en la estructura rígida en la figura 7. Además en la figura 8 se puede apreciar una reducción considerable de la formación de rotulas plásticas, comportándose la estructura casi elásticamente, producto de un diseño no convencional con dissipadores de energía.

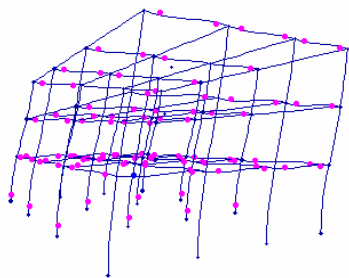


Figura 7. Formación de rotulas plásticas en la estructura rígida

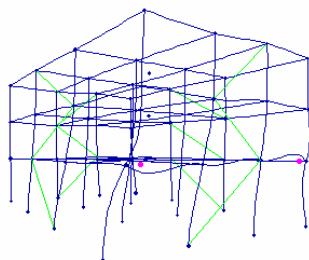


Figura 8. Formación de rotulas plásticas en la estructura con dissipadores

5.6 COSTOS

La incorporación de dissipadores de energía en la estructura involucra un costo, y el costo es una importante consideración en la decisión del uso de los dissipadores, y que tipo de dissipadores podrían ser utilizados en un determinado proyecto.

El análisis, diseño, selección, fabricación e instalación de los dissipadores en una estructura, depende de varios e importantes variables que incluyen:

- Aceleración sísmica
- Condiciones del terreno de fundación.
- Tipo de estructura.
- Periodo de vida útil de la estructura.
- Objetivos de desempeño.

- Cantidad de dissipadores
- Ciclo de vida de los dissipadores.
- Capacidad requerida de los dissipadores.
- Reforzamiento requerido de los elementos estructurales.
- Instalación y detalles constructivos.
- Interrupción de la ocupación y puesta en servicio durante la construcción.
- Mantenimiento requerido, inspección y costos de reemplazo.

Varios de estos puntos citados no han sido adecuadamente tratados en la literatura, y algunos son altamente variables.

La estructura con dissipadores de energía tendría un ahorro debido a que no es necesario un aumento de la sección de las columnas como alternativa de solución para rigidizar la estructura nueva tendría un incremento en el costo, incluyendo concreto, acero y encofrado, de \$ 3380 (\$5.2/m², 4%). La estructura con la inclusión de dissipadores de energía, un dissipador por nivel, tendría un costo solo de los dissipadores de aproximadamente S/. 19200.0 (\$ 6000).

Esta comparación de costos se dio en el supuesto caso de una estructura nueva, si fuera una estructura existente y se reforzaría con la alternativa tradicional, estos costos se incrementarían y también se debe de tener en consideración el tiempo de construcción. Finalmente, estos costos son referenciales y pueden variar según las características propias de cada estructura.

La estructura con dissipadores de energía tendría un ahorro debido a que sería necesario un reforzamiento de la estructura como alternativa de solución para rigidizar la estructura cuyo costo aproximado sería de \$80/m² (11-20% del costo total).

El costo de un departamento en promedio en el distrito de Jesús Maria es de unos \$ 36000 (\$400/m²), y en el distrito de Miraflores es de unos \$63000 (\$700/m²). En resumen, nos brinda un costo de \$400-700/m². Los dissipadores de energía costarían \$8000 por nivel, \$4000 por departamento, lo que nos brinda un costo de \$47/m² (6-11% del costo total).

El costo solamente de la estructura aproximadamente es de \$150/m², lo que nos brinda un costo de 21-38% del costo total. El costo de reparación de las estructuras es de \$65/m² (43% CT), el de reparación y reforzamiento puede ser aproximadamente de \$80/m² (53% CT), sin considerar acabados e instalaciones.

Al evaluar los costos de las estructuras con dissipadores de energía, se deben de tener en consideración los siguientes aspectos:

- Ahorro en elementos y placas.
- Ahorro en cimentación
- Tiempo de reparación y puesta en servicio de la estructura.
- Costo de reparación en elementos estructurales y acabados.
- Daño en instalaciones eléctricas, sanitarias, gas natural, etc.
- Mayor seguridad por incendios pos-sismo.
- Estructura nueva o existente

Su uso es más importante en edificios altos, importantes, que se desean preservar, y que no deben dejar de funcionar después de un evento sísmico.

6. CONCLUSIONES Y/O RECOMENDACIONES

- La estructura con aumento de sección de sus columnas presenta un periodo mayor en comparación al de la estructura con disipadores de energía.
- La incorporación de disipadores de energía reduce las distorsiones de entrepiso en relación al porcentaje de amortiguamiento de diseño del disipador.
- El aumento de sección en los elementos reduce considerablemente las distorsiones, pero incrementa el cortante en la base y la masa de la estructura.
- Las vigas con ambas alternativas presentan momentos similares, por lo que su área de acero también, indicando que no existe una marcada diferencia con ambas alternativas.
- Las columnas de la estructura con disipadores de energía recibe menos carga axial y momento, reflejándose en un menor costo de la cimentación.
- La estructura con disipadores de energía presenta una menor cantidad de rotulas plásticas en sus elementos en comparación a la estructura tradicional, brindando un mejor entendimiento de su probable mecanismo de falla. Así como menores costos de reparación.
- Estos parámetros indican que los daños estructurales y no estructurales han sido significativamente reducidos cuando se comparan al sistema estructural con elementos rígidos de concreto armado.
- En lo referente al análisis comparativo de costos, el uso de disipadores de energía es más conveniente en reforzamiento de estructuras existentes y/o en estructuras con características especiales.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aiken, I. (1998). Testing of Seismic Isolators and Dampers Considerations and Limitations, Proceedings, Structural Engineering World Congress, San Francisco, California. USA.
- 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.
- Computers and Structures, INC. (2006). SAP2000 Version 10.0.1. A Computer Program for Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three Dimensional Structures, Berkeley, California, USA.
- 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.
- 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.
- Chang, S., and Makris, N. (2000). Effect of Various Energy Dissipation Mechanisms in Suppressing Structural Response, 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
- Kelly, T. (2001). In-Structure Damping and Energy Dissipation, Design Guidelines Published by Holmes Consulting Group, Wellington. New Zealand.
- Miyamoto, K. and Hanson, R. (2002). U. S. Design of Structures with Damping Systems, SEWC2002, Yokohama, Japan.
- Miyamoto, H., and Taylor, D. (2001). Structural Control of Dynamic Blast Loading Using Fluid Viscous Dampers, Marr Shaffer & Miyamoto, Inc. Sacramento, California. USA.
- NEHRP, (1999). Recommended Guidelines for the Seismic Design of Buildings and Other structures, FEMA 368, Washington, DC.
- Taylor, D. (2005). Buildings: Design for Damping, Proceedings of the Boston Society of Civil Engineers, BSCES, Lecture Series, "Dynamics of Structures". USA.
- Oviedo, R., (2005). Reforzamiento Estructural Convencional versus Disipadores de Energía, XV CONIC, Ayacucho, Peru.
- Taylor Devices, INC. (2003). Sample Technical Specifications for Viscous Damping Devices, Technical Paper for Design. North Tonawanda, NY. USA.
- Villarreal, G., (2005). Interacción Sísmica Suelo-Pilote-Superestructura en Edificios Altos, Moscow State Civil Engineering University, Rusia.