

## DESARROLLO Y ENSAYO DE DISIPADORES DE ENERGIA POR DEFORMACION DE MATERIAL VISCOELASTICO

Enrique Ponce de León, Vladimir Vera, Ofelia Moroni, Rubén Boroschek, Mauricio Sarrazin.

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile  
Casilla 228/3, Santiago, Chile

### RESUMEN

Una alternativa de protección sísmica de las estructuras es mejorar su capacidad de disipación de energía, a través de la incorporación de dispositivos especiales que cumplan con esa función; con ello la respuesta dinámica del sistema disminuye, con la consiguiente reducción y control de los daños. Este trabajo presenta el desarrollo, la fabricación y el ensayo de un disipador de energía basado en la deformación por corte de material viscoelástico, consistente en dos cilindros de acero concéntricos, conectados entre sí por un relleno de goma de alto amortiguamiento.

### SUMMARY

This paper describes the research and development of energy dissipation dampers for vibration control of buildings, with descriptions of characteristics of the rubber material, design formulae for damper devices and dynamic test results of full-scale damper devices. The damper devices used for the tests are cylindrical filled with high damping rubber material between two steel pipes of different diameter. These kinds of damper are placed in steel diagonal braces in industrial buildings to mitigate vibrations and damages caused by earthquake motions.

### INTRODUCCION

Una alternativa de protección sísmica de las estructuras es mejorar su capacidad de disipación de energía, a través de la incorporación de dispositivos especiales que cumplan con esa función; con ello la respuesta dinámica del sistema disminuye, con el consiguiente control y reducción de los daños. Existen dos tipos de sistemas disipadores de energía: los activos y los pasivos. Los sistemas pasivos pueden ser, a su vez, de diferentes clases dependiendo del mecanismo de disipación que utilicen: fricción, deformación plástica, deformación viscosa o viscoelástica, entre otros.

A diferencia de los sistemas de aislación sísmica, los disipadores no actúan directamente sobre el movimiento de la base de la estructura, sino que modifican su respuesta al agregar rigidez

y resistencia a la estructura. Los dispositivos deben ubicarse entre puntos de la estructura que experimenten desplazamientos o velocidades relativas, lo que los hace indicados para su colocación en las diagonales de edificios o naves industriales en donde permiten controlar la deformación y el daño generado por vibraciones de viento y maquinarias, prevenir deformaciones plásticas en elementos estructurales, controlar deformaciones por temperatura y reducir la respuesta y el daño frente a sismos o solicitaciones mayores. Aunque algunos en un comienzo, pueden rigidizar la estructura, al alcanzar ciertos niveles de deformación, entran en acción, disipando energía y reduciendo las fuerzas y desplazamientos inducidos en la estructura. El cálculo de la respuesta de una estructura así adaptada es factible a través de modelos simples lineales o lineales equivalentes.

El número de edificios construidos en el mundo, que incluyen estos dispositivos ha aumentado en los últimos años. En Japón, de acuerdo a Wada et al. (Ref. 1) se han construido al menos 14 edificios de acero de más de 60 mts. de altura que responden al concepto de diseño DTS (Damage Tolerant Structures). En esos casos se diseñan dos sistemas estructurales independientes, uno formado por vigas y columnas que permanece en régimen elástico y soporta las cargas verticales y un sistema encargado de disipar la energía sísmica, de fácil reposición en casos de sufrir daños. El peso de una estructura con este tipo de diseño puede ser hasta un 20% inferior respecto de un diseño tradicional.

En USA se acaba de publicar FEMA 273 (Ref. 2), en la cual se dan indicaciones para el diseño y análisis de estructuras que incluyan dispositivos disipadores de energía, con lo cual se dará un impulso al uso de este tipo de protección sísmica. Marioni et al (Ref. 3) dan cuenta del desarrollo de un proyecto financiado por la Comunidad Económica Europea donde participan empresas, universidades y laboratorios de ensayo de Italia, Francia, Portugal e Inglaterra, y cuyo objetivo es optimizar dispositivos de disipación de energía para reducir riesgos sísmicos en estructuras e instalaciones industriales.

Este trabajo presenta el desarrollo, la fabricación y el ensayo de un disipador de energía basado en la deformación por corte de material viscoelástico, consistente en dos cilindros de acero concéntricos de 0.70 mt de longitud, conectados entre sí por un relleno de goma de alto amortiguamiento de 23 mm de espesor.

## CARACTERISTICAS DE LOS DISIPADORES DE ENERGIA

Cuando una estructura es afectada por un sismo, parte de la energía entregada por éste vuelve al suelo a través de la misma estructura y el resto de la energía es absorbida por el sistema estructural. Esta última se disipa a través de la deformación que experimenta la estructura y por mecanismos propios de los materiales que los constituyen. Parte de este proceso disipativo está asociado a daño estructural. Alternativamente se pueden usar elementos dedicados exclusivamente a esa función disipadora, de modo que la estructura se mantenga siempre en el rango elástico de deformaciones, evitando daños en ella y posiblemente disminuyendo los daños en los elementos no estructurales.

Los dispositivos pueden ubicarse dentro de la estructura original, por ejemplo en las diagonales de un edificio de marcos de acero u hormigón, como parte de una estructura auxiliar externa o conectando estructuras adyacentes.

Depen  
clasificar en (

**Sistemas de a**  
que se produc  
forma de calo  
número repeti  
por la amplitu  
que se gener  
materializarse  
y no degradab  
siendo las más

**Disipadores p**  
permiten disip  
o bien por ex  
problemas deb  
de corte, flexi  
fabricar a parti  
cual los hace b  
ser instalados e  
la frecuencia d

**Amortiguador**  
viscoelástico, a  
deformación, s  
la deformación  
rigidez y amort  
frecuencia de  
aumentar la tem  
niveles bajos d  
Ensayos realiza  
miento se reduc  
de algunas hora

Chang e  
de energía vis  
estructuras de a  
tipo de estructu

Dada la  
miento a nivel r  
que en el rango  
pueden material



Dependiendo del tipo de mecanismo de disipación de energía, los dispositivos se pueden clasificar en (Ponce de León, Ref. 4):

**Sistemas de amortiguamiento por fricción:** Estos dispositivos disipan energía mediante la fricción que se produce entre dos elementos expuestos a desplazamientos relativos. La energía se disipa en forma de calor, por lo cual se pueden modificar las propiedades del dispositivo después de un número repetido de ciclos de carga y descarga. Su comportamiento generalmente, no se ve afectado por la amplitud de la deformación, frecuencia o número de ciclos aplicados. La curva de histéresis que se genera es casi rectangular, típica del fenómeno de fricción de Coulomb. Pueden materializarse a partir de uniones estructurales existentes. Para lograr un comportamiento confiable y no degradable, es necesario que la fricción se desarrolle entre elementos de naturaleza diferente, siendo las más usuales acero-cobalto y acero-latón.

**Disipadores por deformación plástica y extrusión de metales:** Básicamente son sistemas que permiten disipar energía por deformaciones plásticas de placas de acero estructural o acero dulce, o bien por extrusión de plomo a través de orificios. Son estables en el tiempo y no presentan problemas debido a factores ambientales. La deformación en el rango plástico puede ser del tipo de corte, flexión, torsión, extensión o una combinación de éstos. Son bastante simples y se pueden fabricar a partir de un sólo material, ofreciendo gran variedad en cuanto a tamaño y geometría, lo cual los hace bastante versátiles en los tipos de estructuras en que pueden usarse, dado que pueden ser instalados en pequeños espacios. La energía disipada depende del nivel de deformaciones y de la frecuencia de los ciclos aplicados.

**Amortiguadores viscoelásticos:** Disipan energía por deformación dinámica de un material viscoelástico, a través de generación de calor. Pueden funcionar desde niveles pequeños de deformación, siendo adecuados para controlar pequeñas deformaciones. El desfase angular entre la deformación y la fuerza resistiva da lugar a curvas de histéresis elípticas. Las propiedades de rigidez y amortiguamiento dependen del nivel de deformaciones aplicado, de la temperatura, de la frecuencia de los ciclos y del volumen de material involucrado. El material pierde rigidez al aumentar la temperatura, haciendo difícil su utilización; frecuencias bajas de deformación generan niveles bajos de energía disipada reflejados en curvas de histéresis con elipses de área pequeña. Ensayos realizados por Suizu et al. (Ref. 5), indican que las propiedades de rigidez y amortiguamiento se reducen al aplicar un número significativo de ciclos; aunque éstas se recuperan después de algunas horas.

Chang et al (Ref 6) han realizado diversos ensayos dinámicos de prototipos de disipadores de energía viscoelásticos y han ensayado en mesa vibradora modelos a escala reducida de estructuras de acero que los incluyen. Además han propuesto un procedimiento para diseñar este tipo de estructuras (Ref 7).

## DISEÑO DE LOS DISIPADORES DE ENERGIA

Dada la experiencia acumulada en el desarrollo de aisladores de goma de alto amortiguamiento a nivel nacional, se ha decidido estudiar la factibilidad de fabricar disipadores de energía que en el rango de aplicación se comporten como amortiguadores viscoelásticos. Básicamente se pueden materializar dos geometrías posibles: una en base de placas de acero rectangulares

conectadas por capas de goma o de cilindros concéntricos de distinto diámetro rellenos con goma entre ambos tubos, tal como se muestra en la Figura 1.

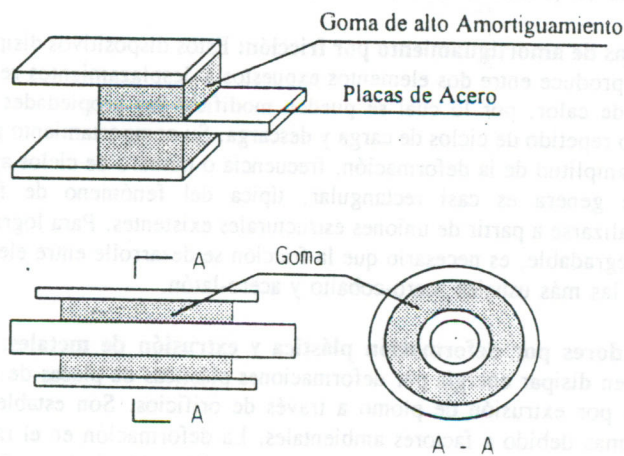


Figura N° 1. Formas de amortiguadores viscoelásticos

La respuesta dinámica de un amortiguador sometido a desplazamientos sinusoidales controlados, es:

$$\gamma = \gamma_o \sin \omega t \tag{1}$$

$$\sigma = \sigma_o \sin (\omega t + \delta) \tag{2}$$

donde  $\gamma$  es la deformación de corte,  $\sigma$  tensión de corte,  $\gamma_o$  deformación de corte máxima,  $\sigma_o$  tensión de corte máxima,  $\delta$  desfase angular y  $\omega$  frecuencia angular. El desfase entre la deformación y tensión produce un ciclo de histéresis, donde el área encerrada dentro de la curva representa la energía disipada. El coeficiente de amortiguamiento equivalente  $C$  y la rigidez  $K$  pueden obtenerse mediante las expresiones:

$$K = \frac{F_m}{X_m} \quad ; \quad C = \frac{\Delta W}{(\pi \omega X_m^2)} \tag{3}$$

donde  $\Delta W$  es el área encerrada en el lazo del ciclo,  $X_m$  es la amplitud máxima del desplazamiento y  $F_m$  es la fuerza asociada al máximo desplazamiento.



De acuerdo a Suizu et al (Ref 5), en el caso de un disipador constituido por cilindros concéntricos de diámetro exterior  $D_e$ , diámetro interior  $D_i$ , largo  $L$  y espesor de goma  $T = (D_e - D_i)/2$ , las ecuaciones anteriores se expresan como:

$$K = \frac{\pi G (D_e + D_i) L}{2T} \quad (4)$$

$$C = \frac{\pi G \tan \delta (D_e + D_i) L}{(2\omega T)} \quad (5)$$

Expresando las ecuaciones (1) y (2) de la forma siguiente:

$$\sigma(t) = \gamma_o (G' \sin(\omega t) + G'' \cos(\omega t)) \quad (6)$$

se definen los términos  $G'$ , módulo de almacenaje y  $G''$ , módulo de pérdida, como:

$$G' = \frac{\sigma_o}{\gamma_o} \cos \delta \quad ; \quad G'' = \frac{\sigma_o}{\gamma_o} \sin \delta \quad (7)$$

El ciclo de histéresis sería una combinación de una línea recta  $\sigma(t) = G' \gamma(t)$ , que representa la componente elástica, y de una elipse  $\sigma(t) = \pm G'' \sqrt{\gamma_o^2 - \gamma(t)^2}$ , que representa la componente de energía de disipación. El módulo de almacenaje indica la rigidez secante del material y el módulo de pérdida indica la capacidad de disipación de energía.

Por otra parte, el factor de pérdida  $\tan(\delta)$  se expresa como:

$$\tan(\delta) = \frac{G''}{G'} \quad (8)$$

La energía que se disipa en un ciclo por un volumen de material  $V$  es:

$$\Delta W = \pi G'' \gamma_o^2 V \quad (9)$$

En la Figura 2 se muestran los propiedades de rigidez y amortiguamiento del compuesto de goma utilizado en función de las deformaciones y de la frecuencia de los ciclos sinusoidales a que se ha desarrollado el ensayo.

Dadas las características de la goma, el dimensionamiento del disipador queda determinado por la rigidez que interesa obtener. En este caso se ha fijado una rigidez igual a 7.5 ton/cm. Otras limitaciones han sido la disponibilidad en el mercado chileno de perfiles tubulares y las condiciones impuestas por el dispositivo de ensayo.

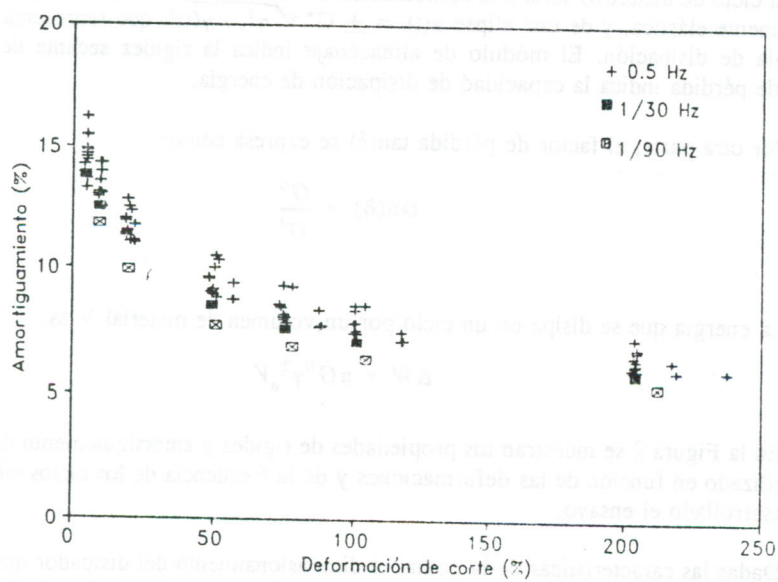
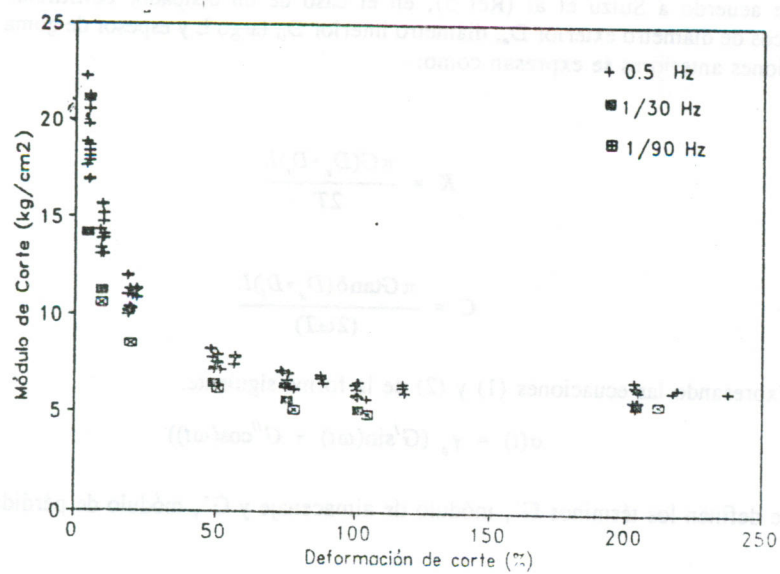


Figura N° 2. Propiedades de la Goma

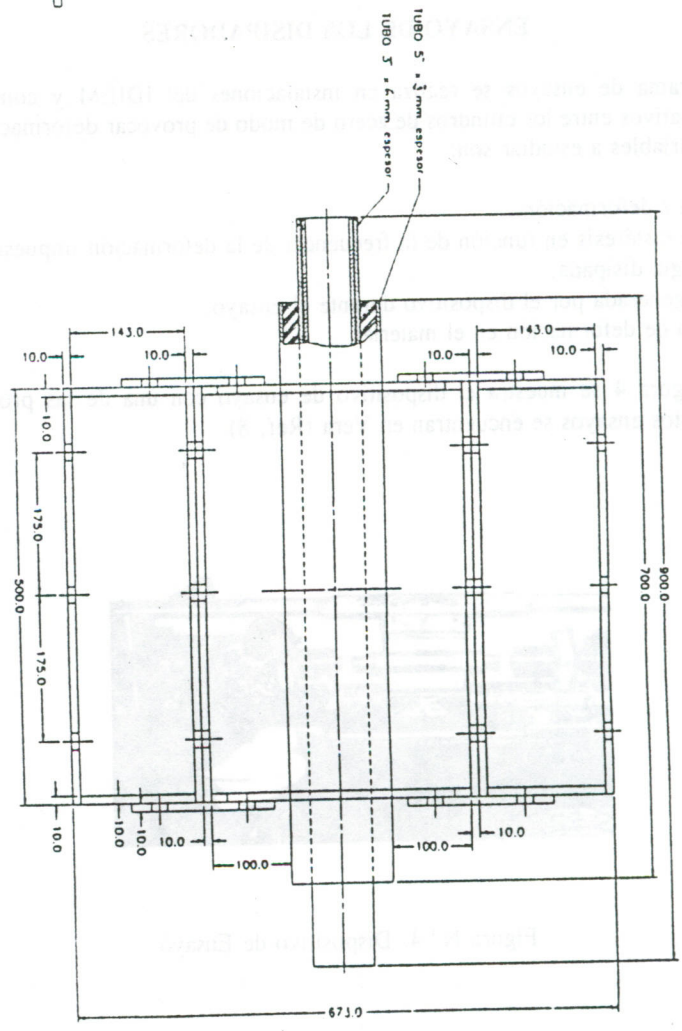
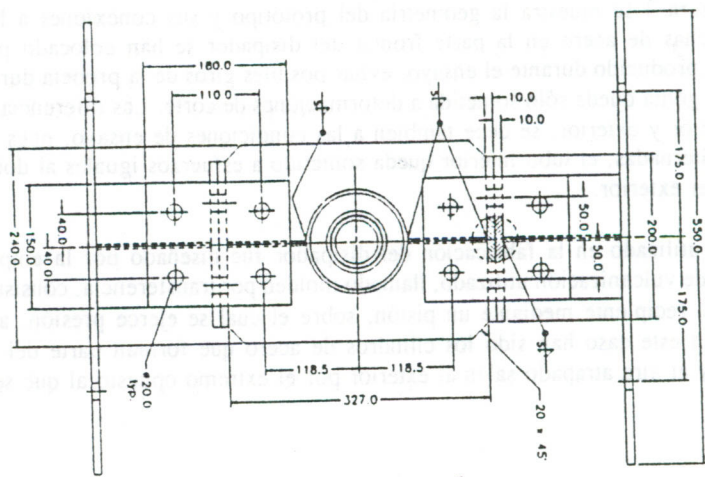


Figura N° 3. Probeta de Ensayo



En la Figura 3 se muestra la geometría del prototipo y sus conexiones a la máquina de ensayo; las planchas de acero en la parte frontal del disipador se han colocado para resistir el esfuerzo de corte producido durante el ensayo, evitar posibles giros de la probeta durante el mismo y asegurar que la goma quede sólo sometida a deformaciones de corte. Las diferencias de espesores de los tubos interior y exterior, se debe también a las condiciones de ensayo, pues para producir ciclos de carga alternadas, el tubo interior queda sometido a esfuerzos iguales al doble de los que se aplican sobre el exterior.

El molde utilizado en la fabricación del disipador fue diseñado por la empresa VULCO S.A.. El proceso de vulcanización utilizado, llamado moideo por transferencia, consiste en traspasar la goma desde un recipiente mediante un pistón, sobre el cual se ejerce presión, a un elemento horizontal, que en este caso han sido los cilindros de acero que forman parte del disipador. El exceso de goma y el aire atrapado salen al exterior por el extremo opuesto al que se introduce la goma.

### ENSAYO DE LOS DISIPADORES

El programa de ensayos se realiza en instalaciones del IDIEM y consisten en aplicar movimientos relativos entre los cilindros de acero de modo de provocar deformaciones de corte en la goma. Las variables a estudiar son:

- Curvas fuerza / deformación.
- Diagramas de histéresis en función de la frecuencia de la deformación impuesta.
- Nivel de energía disipada.
- Temperatura generada por el dispositivo durante el ensayo.
- Nivel máximo de deformación en el material.

En la Figura 4 se muestra el dispositivo de ensayo con una de las probetas instaladas. Resultados de estos ensayos se encuentran en Vera (Ref. 8).

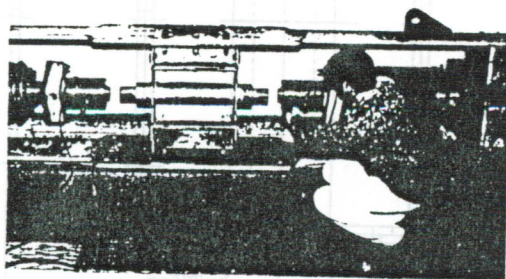


Figura N° 4. Dispositivo de Ensayo

Este trabajo  
disipa energía de n  
a un modelo teóric

Los autores  
1970732) y a la em  
trabajo.

1. Wada, A.,  
earthquake i
2. FEMA, "NE  
273, Federal
3. Marioni, A.,  
Forni, M., M  
y Ahmadi, H  
the EC cour  
Taormina, Ita
4. Ponce de Leó  
Título de Inge
5. Suizu, Y., Su  
application of  
Post-Smirt Co
6. Chang, K., S  
viscoelastic da  
pp 1418-1426.
7. Chang, K., S  
structures with  
Passive Energy
8. Vera, V., "De  
Título de Inger



## CONCLUSIONES

Este trabajo concluye a partir del resultado de los ensayos realizados, que el dispositivo disipa energía de manera efectiva y confiable; que su comportamiento es predecible y que obedece a un modelo teórico específico, y que su fabricación es factible en el país a un costo razonable.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Chile, a Fondecyt (Proyecto N° 1940466 y N° 1970732) y a la empresa VULCO S.A. por el apoyo brindado a la ejecución y divulgación de este trabajo.

## REFERENCIAS

1. Wada, A., Iwata, M., Huang, Y., "Seismic design trend of tall buildings after Kobe earthquake in Japan", Proc. Int. Post-Smirt Conf. Seminar, Taormina, Italia, 1997.
2. FEMA, "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings", Report N° FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
3. Marioni, A., Dumuolin, C., Bettinali, F., Dusi, A., Serres, E., Azevedo, J., Cesari, F., Forni, M., Martelli, A., Castellano, M., Medeot, R., Bonacina, G., Renda, V., Fuller, K. y Ahmadi, H., "Development and application of innovative energy dissipation systems in the EC countries-Part 1: EC Project REEDS", Proc. Int. Post-Smirt Conf. Seminar, Taormina, Italia, 1997.
4. Ponce de León, E., "Estudio en Disipadores Pasivos de Energía", Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, U. de Chile, 1996.
5. Suizu, Y., Suzuki, S., Kasahara, Y., Fujita, S., Fujita, T., "Research, development and application of high-damping rubber dampers for vibration control of buildings", Proc Int. Post-Smirt Conf. Seminar, Santiago, Chile, pp 272-286, 1995.
6. Chang, K., Soong, T., Oh, S., Lai, M., "Seismic behavior of steel frame with added viscoelastic dampers", Journal of Structural Engineering, Vol 121, N° 10, Octubre 1995, pp 1418-1426.
7. Chang, K., Soong, T., Lai, M., Nielsen, E., "Development of a design procedure for structures with added viscoelastic dampers", Proc. ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, Appl. Technol. Council, Redwood City, Calif. Vol. 2, 1993, pp 473-484.
8. Vera, V., "Desarrollo y fabricación de disipadores de energía", Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, U. de Chile, (en desarrollo).