

EFICIENCIA DE DISIPADORES SÍSMICOS DE PARED BASADOS EN AMORTIGUADORES VISCOSOS - VISCOUS WALL DAMPER

José E. Stuardi^a, Julio C. Massa^{a,b} y Juan F. Giró^{a,c}

^a *Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina, jstuardi@gmail.com, <http://www.efn.uncor.edu>*

^b *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto, Argentina, Tel./Fax.:0358-4676246, jmassa@efn.uncor.edu, <http://www.ing.unrc.edu.ar>*

^c *Departamento de Ingeniería de Sistemas de Información, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina, juanfgiro@gmail.com, <http://www.frc.utn.ar>*

Palabras clave: disipadores sísmicos, aislamiento sísmico, viscous wall damper.

Resumen. Los disipadores sísmicos son una alternativa eficiente del aislamiento sismoresistente, ya que su inclusión no necesita de técnicas constructivas especiales, su efectividad es relativamente alta y su costo relativamente bajo. Estos dispositivos incluidos en puntos estratégicos de la estructura disipan energía en función de los desplazamientos relativos entre sus extremos. La capacidad de reducir las fuerzas sísmicas depende fuertemente del diseño y del tipo; es por ejemplo necesaria una gran cantidad de disipadores viscoelásticos tradicionales para aumentar significativamente el amortiguamiento estructural de un edificio, por lo que se asocia el uso de este tipo de disipadores al caso de vibraciones inducidas por viento. Los Viscous Wall Damper (VWD) son verdaderos amortiguadores viscosos especialmente adaptados en su forma constructiva a una forma plana y de manera de poder ser conectados entre los pisos de los edificios mediante diagonales y contradiagonales. Los módulos internos de los disipadores basan su accionar en la fuerzas viscosas generadas por placas planas paralelas y proveen una fuerza viscosa horizontal según una relación constitutiva fuerza-velocidad no lineal. La construcción es simple, no contando con piezas mecánicas sofisticadas. El sistema resulta confiable en base a la sencillez, no hay mecanismos sofisticados, válvulas o sellos. La disipación viscosa no genera abrasión, rozamiento o desgaste. A diferencia de los disipadores basados en materiales con comportamiento viscoelástico, la capacidad de disipación resulta alta y comparable con otros sistemas de disipación. Las fuerzas viscosas se incrementan continuamente con la demanda (velocidad).

La efectividad de los disipadores VWD es probada en un edificio de 52 plantas y período natural de 5.8 segundos. El diseño sísmico del edificio contempla como nuevas variables la cantidad, disposición y capacidad de los disipadores VWD. Mientras que en el diseño tradicional la disipación de energía ocurre sólo en regiones críticas de la estructura, esta tarea es adicionalmente abordada en este diseño por los VWD que proveen una disipación estable, confiable y verificada en su magnitud. El estudio numérico del edificio sujeto a análisis contempla distintas señales sísmicas en el dominio del tiempo, considerando el amortiguamiento no proporcional y no lineal introducido por los disipadores. Magnitudes como “drift” de entrepiso, fuerzas de corte de entrepiso y aceleraciones en el edificio son tomadas como variables de diseño para verificar la conveniencia del sistema provisto de disipadores VWD respecto del comportamiento dinámico del sistema original.

1 INTRODUCCIÓN

La ductilidad y la redundancia estructural son la base de los criterios modernos de diseño, que permiten la reducción de las fuerzas sísmicas. Sin embargo la ductilidad conduce a daños en elementos estructurales y no estructurales, lo que puede causar falta de funcionalidad temporal del edificio. Por esta razón, la tendencia actual de diseño se orienta a concentrar el daño en ciertos dispositivos agregados y sin crear daños en la estructura. La disipación de energía en el diseño convencional se concentra en los nudos de unión de vigas y columnas, donde el comportamiento inelástico conduce a daños estructurales. A pesar que las secciones sean específicamente diseñadas, el comportamiento histerético finalmente se degrada y con ello la disipación. Además, usualmente se encontrarán asociados daños en elementos no-estructurales como tabiques, puertas, cielorrasos, etc.

Los disipadores de energía pueden entenderse como una consecuencia del diseño sísmico moderno, donde los puntos débiles se corresponden con dispositivos mecánicos especialmente diseñados para disipar energía en manera estable. En el caso de sismos severos donde los dispositivos sean dañados, pueden ser reemplazados sin interferir con el uso del edificio (Jara, 1994; Hanson, et. al., 1993).

Los disipadores de energía son en general una eficiente alternativa frente a las limitaciones del aislamiento de base que requiere una construcción especial para alojar a los aisladores, juntas de separación entre edificios, flexibles para la distribución de agua, gas y cloacas. Además se utilizan para proteger edificios bajos a medios altos. Los disipadores son una eficiente alternativa en edificios bajos y altos y su costo es a menudo relativamente bajo.

Existen actualmente una gran cantidad de sistemas de disipadores que han sido propuestos, incluyendo otros que ya han sido usados en sistemas de aislamientos de base, a saber:

- Sistemas de plastificación de metales, acero, aluminio, plomo: ADAS (Added Damping and Stiffness), TADAS (Tri-ADAS), Honeycomb Damper, Steel Slit Damper, Bell Damper, Shear Link, Aluminium Shear Link, donde se utilizan usualmente metales de bajo punto de fluencia y gran capacidad de disipación.
- Basados en fricción: Pall damper, Oiles damper, Brace Damper entre otros.
- Basados en aleaciones con memoria de forma, o superelasticidad (Ni,Ti, Cu-Zn-Al, Cu-Al,Ni).
- Basados en materiales Visco-elásticos, disipadores y paredes disipadoras.

Los sistemas de disipación metálicos utilizan el comportamiento histerético de los metales cuando son deformados en un rango post elástico. El sistema ADAS está compuesto de placas en forma de X agrupadas en paralelo. Poseen comportamiento estable, confiabilidad a largo término y una buena resistencia contra factores ambientales además de resultar económicos (Bergman and Goel, 1987; Whittaker et al., 1991). El TADAS (Tsai and Hog, 1992) es similar, pero de forma triangular, tiene como beneficio que no se requiere restricción rotacional en la conexión con la viga. El Shear Link tiene forma de H (Cahíz et al., 1998; Bozzo et al., 1998). Los sistemas de fricción tienen la ventaja de producir ciclos histeréticos, donde la energía disipada es máxima. Se destacan los producidos por Oiles Industry and Co., Pall Dynamics (Venzina, et. al, 1992), Fluor Daniel Inc. (Richter et al, 1990). La fricción puede variar sin embargo fuertemente durante el deslizamiento y generar altas frecuencias durante el proceso stick-slip. Las aleaciones con memoria de forma, permiten grandes deformaciones histeréticas sin efectos permanentes, ya que las deformaciones a bajas temperaturas que luego son expuestas a elevadas temperaturas vuelven a su forma anterior. Se permite así la construcción de dispositivos que son autocentrantes y permiten su utilización en un elevado número de ciclos (Witting and Cozzarelli, 1992).

Los disipadores viscoelásticos se construyen con placas metálicas adheridas a materiales viscoelásticos y son más apropiados para el control de vibraciones, que para el control sísmico, debido a su baja capacidad de disipación de energía (Kirekawa et al., 1992). El amortiguador viscoso fue desarrollado inicialmente por Oiles and Sumimoto Construction, presentando un fluido viscoso entre placas paralelas, su efectividad fue probada en un edificio de 15 pisos (Miyazaki and Mitsusaka, 1992).

Numerosos trabajos han sido publicados para comprobar la eficacia de disipadores basados en formas novedosas y principios de disipación para la protección sísmica de edificios, junto con estudios numéricos y ensayos de laboratorio. Los métodos de cálculo y diseño de los edificios, depende fuertemente del tipo de disipadores y de la posibilidad del tratamiento numérico de la forma de disipación (Maldonado-Mercado, 1995).

2 OBJETIVOS

Se analiza el mejoramiento sismo resistente de una torre de grandes dimensiones a partir de la inclusión de dispositivos mecánicos en el seno de su estructura. La torre se construye actualmente en la Comuna de Las Condes, Santiago de Chile y contará con 52 plantas y 120.000 m² en 192 metros de altura, con lo que superará a los más altos edificios de ese país. Tendrá 2 helipuertos y 7 pisos subterráneos.

En el presente artículo se estudia la posibilidad de incorporación de disipadores del tipo viscoso VWD y las reducciones de esfuerzos obtenibles. El análisis se realiza mediante la utilización de un programa comercial de elementos finitos. En la Figura 1 se muestra una vista del modelo de la torre.

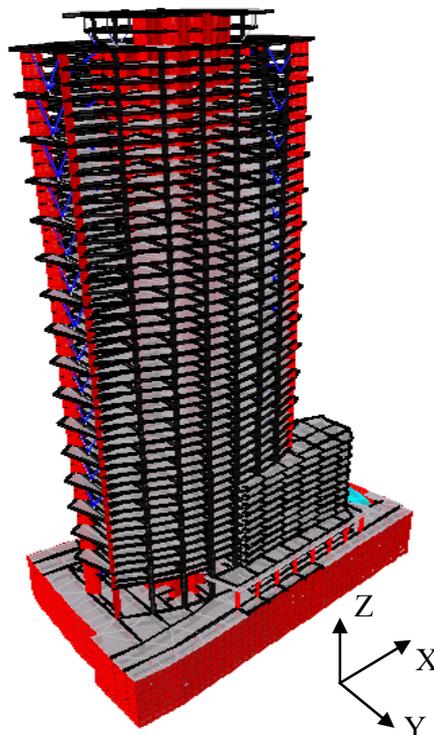


Figura 1: Vista del modelo del edificio torre estudiado

El diseño estructural del edificio prevé 25 cruces de rigidización con forma de X construidas en tubo estructural en las fachadas izquierda y derecha del modelo mostrado (plano YZ), conectando las plantas del edificio de a 3 pisos en altura. La posibilidad de inclusión de dispositivos se encuentra limitada por la arquitectura y el grado de avance del proyecto.

3 CARACTERÍSTICAS DE LOS DISIPADORES

Los dispositivos viscoelásticos fluidos han sido extensivamente usados en sistema de absorción de choque y vibraciones en la industria aeroespacial y militar, y se basan en la resistencia que opone el medio a fluir a través de una restricción. Estos dispositivos han sido adaptados para su uso en construcciones civiles y pueden poseer una gran capacidad de disipación generada por fuerzas en cuadratura con los esfuerzos y desplazamientos.

Los módulos disipadores Viscous Wall Damper (VWD) son disipadores viscosos, que se diferencian de los anteriormente citados por su principio de funcionamiento. Están básicamente formados por un recipiente inferior que contiene un fluido viscoso de elevada viscosidad (masa VISCO®) y un cuerpo superior inmerso en la masa y sin ningún contacto metálico con los compartimientos del recipiente inferior, ver Figura 2.

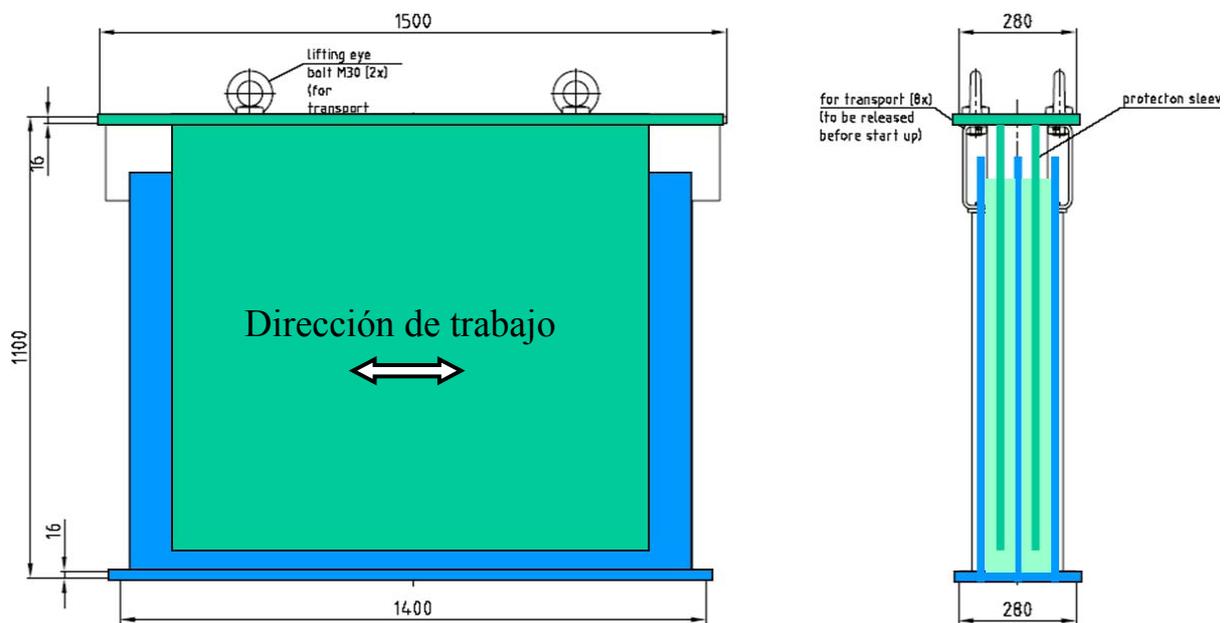


Figura 2: Esquema del dispositivo VWD

El módulo disipador tiene dimensiones 1400 x 280 x 1100 (h) mm y su dirección de trabajo es horizontal en su propio plano. Los disipadores son instalados en la forma tradicional y mediante la colocación de diagonales desde los pisos superiores que proveen fuerzas cortantes. Las características distintivas del sistema, respecto de otros sistemas de disipación son:

- Principio de disipación basado en fuerzas viscosas generadas entre placas planas paralelas.
- Confiabilidad en base a la sencillez del cinematismo, ausencia de mecanismos sofisticados, válvulas, juntas, sellos, rozamiento y desgaste.
- El mecanismo de disipación es totalmente estable en el tiempo, no necesitando mantenimiento ni reparaciones después de eventos sísmicos, no hay mecanismos de abrasión, desgaste, rozamiento ni destrucción por fluencia.
- Alta capacidad de disipación que se mantiene con los ciclos de trabajo y perdura con los años, elevada estabilidad de los componentes incluyendo el medio fluido.
- Las fuerzas de disipación se incrementan convenientemente con la demanda (velocidad).
- No se deteriora por funcionamiento, no requiere reemplazo después de un sismo.

Para el cálculo del sistema de disipación se toma en cuenta información provista por el fabricante (Gerb Schwingungsisolierungen GmbH), basada en pruebas de laboratorio, ver Figura 3.



Figura 3: Módulo de WD durante un ensayo en laboratorio

Las especificaciones se encuentran en la forma de un coeficiente de amortiguamiento $c(v)$ dependiente de la velocidad, según la Figura 4, por lo que la fuerza viscosa F_v puede escribirse como:

$$F_v = c(v) v \quad (1)$$

Esta ecuación puede ser reescrita en otra forma usual

$$F_v = c v^\alpha \quad (2)$$

donde c resulta 2430 kNs/m y α igual a 0.542 para un módulo VWD.

La fuerza viscosa generada en función de la velocidad puede verse en Figura 5, de acuerdo con el exponente positivo α se observa que la fuerza siempre crece cuando aumenta la velocidad.

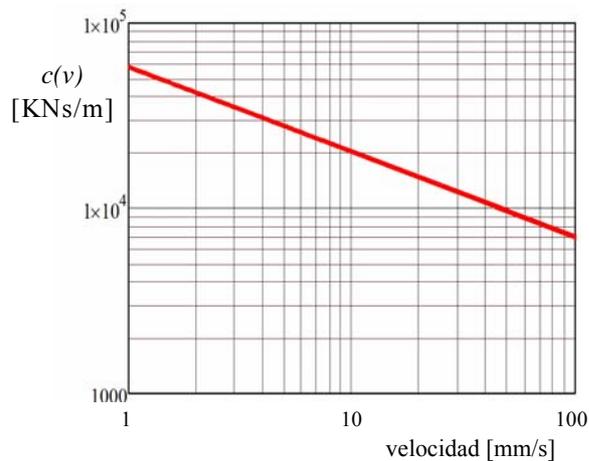


Figura 4: Coeficiente de amortiguamiento de un módulo VWD

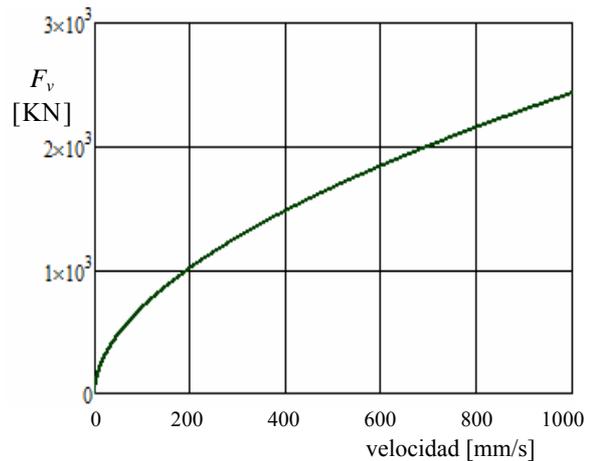


Figura 5: Fuerza disipativa en función de la velocidad en un VWD

4 PROPUESTA DE DISIPACIÓN

Basándose en las posibilidades prácticas reales de inclusión de disipadores en la estructura se realiza un estudio de aplicación de disipadores en ambas fachadas correspondientes a los planos YZ del modelo, en concordancia con la posición de las diagonales de rigidización originalmente previstas. La propuesta contempla el armado de una estructura en forma de “V” para el soporte de los disipadores tipo “chevron brace”, ver Figura 6. Los módulos de disipación se ubican conectando por arriba el vértice inferior de la V y por debajo a una viga horizontal metálica agregada.

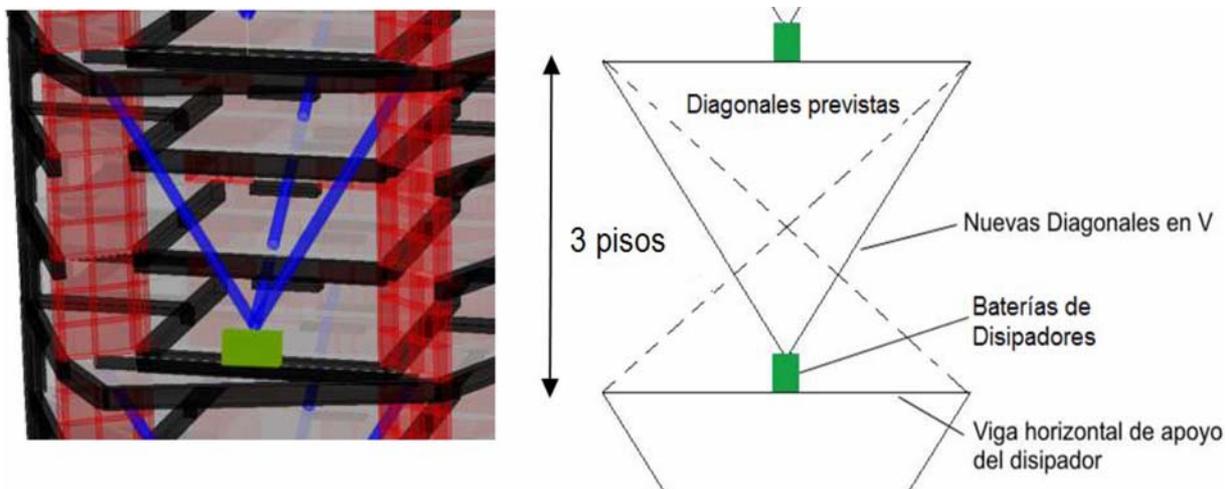


Figura 6: Posición de una batería de disipadores

El diseño del sistema de disipación, consistente en la distribución espacial y la cantidad de disipadores, es analizado primero en forma lineal con el método de espectros de respuesta. Una primera aproximación de las relaciones de amortiguamientos críticos modales obtenibles a través del esquema de disipación es calculable a partir del análisis anterior, si bien debe tenerse en cuenta que, debido a la no proporcionalidad del sistema de amortiguamiento incluido, estos valores deben tomarse sólo como referencia.

Se considera la ecuación de equilibrio dinámico en coordenadas modales correspondiente al modo i de un sistema estructural excitado en su base:

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \lambda_i q_i(t) = -\Gamma_i^d \ddot{u}_g^d(t) \quad (3)$$

donde $q_i(t)$ es la coordenada modal, ξ_i la relación de amortiguamiento crítico modal, λ_i el autovector del problema de valores propios asociado, $\ddot{u}_g^d(t)$ es la aceleración de base medida en una dirección determinada $d = (x, y, z)$ y Γ_i^d el factor de participación modal definido por:

$$\Gamma_i^d = \phi_i^T M E^d \quad (4)$$

donde ϕ_i^T es el modo i transpuesto, M la matriz de masa y E^d el vector de influencias conteniendo los desplazamientos en las coordenadas geométricas resultantes de un desplazamiento unitario en la base en la dirección d considerada.

Los desplazamientos máximos modales \hat{u}_i pueden ser calculados como:

$$\hat{u}_i = \phi_i \sum_d \Gamma_i^d S_{Di}^d \quad (5)$$

donde $S_{Di}^d(\xi_i, T_i)$ es el espectro de desplazamientos relativos del modo i , en la dirección d , calculado a partir del espectro de pseudoaceleraciones S_{SA} . De manera que una primera aproximación lineal de la variable de control, en este caso el drift máximo modal de entrepiso \hat{D}_i , puede ser estimada con el esquema actual propuesto de la siguiente forma:

$$\hat{D}_i = D_{\phi_i} \sum_d \Gamma_i^d S_{Di}^d \quad (6)$$

Finalmente, los máximos finales en la historia del tiempo de las variables en cuestión pueden ser aproximados por el método SRSS o con mejores resultados con el método CQC. La reducción de la respuesta espectral modal en función del amortiguamiento ha sido objeto ya de varias aproximaciones, entre ellas se destaca el factor de reducción η a aplicar sobre un espectro de amortiguamiento ξ_0 para pasar a otro espectro de amortiguamiento ξ_1 , dada por (Newark and Hall, 1981).

$$\eta = \frac{2.31 - 0.41 \ln \xi_1}{2.31 - 0.41 \ln \xi_0} \quad (7)$$

De esta manera, es posible asociar una reducción del perfil en altura de la variable de control del edificio con una necesidad de incremento de amortiguamiento modal.

5 ESTUDIO REALIZADO

En la práctica, el diseño de grandes estructuras provistas de disipación viscosa se realiza utilizando el método de prueba y error. A partir de una configuración de disipadores propuesta se obtiene mediante el programa de EF una aproximación lineal de los incrementos de los amortiguamientos modales, y mediante la ecuación (6) un perfil en altura de las reducciones de la variable de control. Una estimación de las reducciones en altura de la variable de control puede calcularse entonces mediante el método de respuesta espectral, utilizando una envolvente de diseño de los espectros y una linealización de la respuesta de los disipadores. Esto último puede ser logrado, teniendo en cuenta un rango de velocidades de operación de los dispositivos, calculada a su vez desde una respuesta aproximada.

Debido a la característica de no linealidad de los disipadores con la velocidad se realiza además un análisis no lineal en el dominio del tiempo de la respuesta comparativa del edificio sin y con disipadores. Del análisis lineal de las contribuciones modales a la respuesta se concluye que el análisis debe ser extendido hasta el modo de orden 40 con un período de 0,076 segundos.

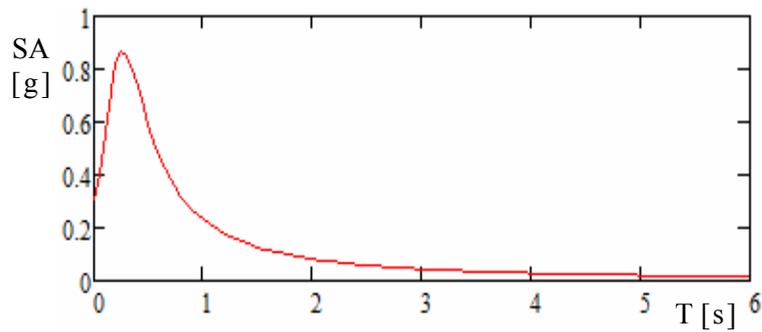


Figura 7: Envolvente de espectros de diseño utilizado

Para el análisis se utiliza una envolvente de espectros de diseño, Figura 7, y dos registros sísmicos reales a saber: Llo Lleo en sus componentes N10E y S80E, y Melipilla componentes NS y EO. Todas las señales fueron escaladas a una aceleración máxima de 0,2 g. Los acelerogramas de los registros sísmicos utilizados en el análisis se observan en Figura 8 y las PSA son mostradas en la Figura 9.

Las componentes de las señales sísmicas Llo Lleo N10E y Melipilla NS fueron aplicadas en la dirección X del modelo, mientras que Llo Lleo S80E y Melipilla EO en la dirección Y. En todos los casos se considera 5% de amortiguamiento crítico para todos los modos considerados como amortiguamiento propio del sistema sin disipadores. En la Figura 10 pueden verse además los espectros SD para los sismos de diseño y las reducciones obtenibles en la respuesta modal en desplazamientos debido al incremento de amortiguamiento.

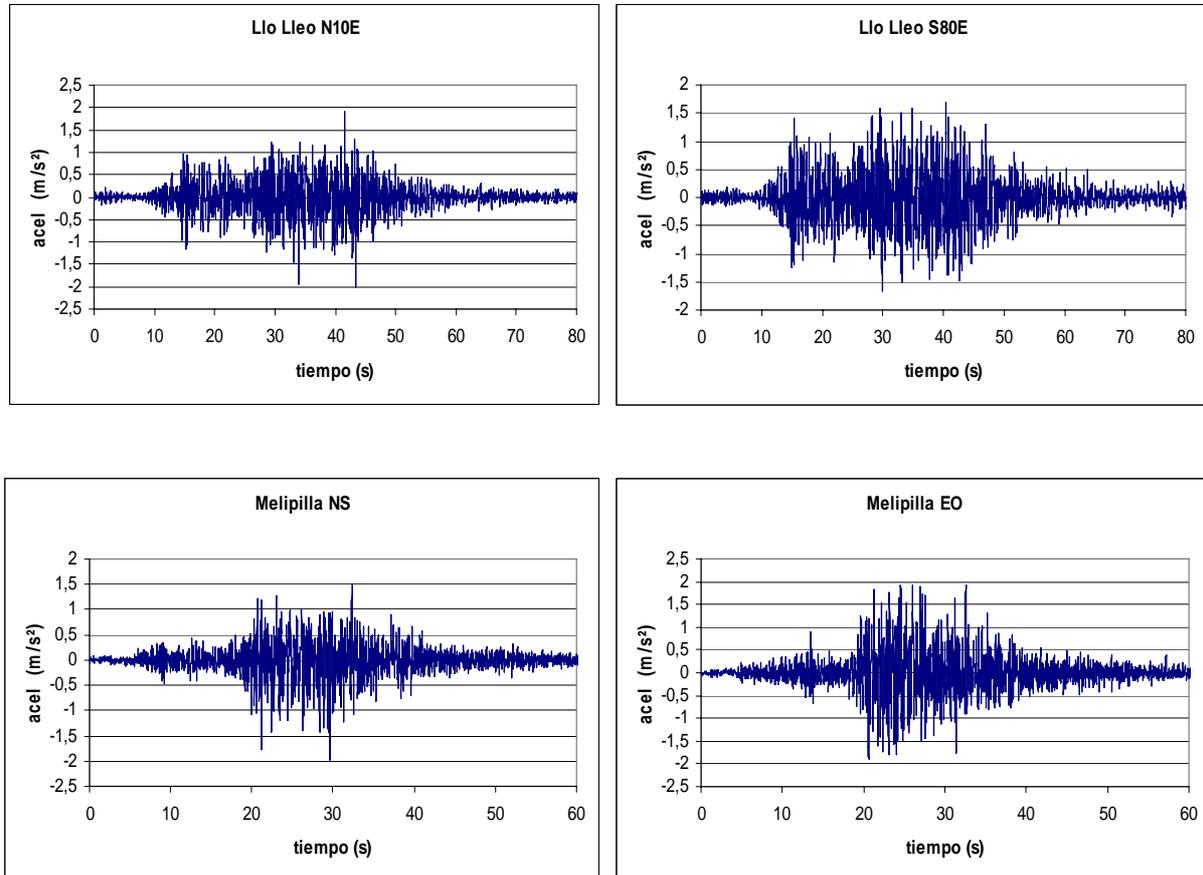


Figura 8: Acelerogramas de los sismos utilizados

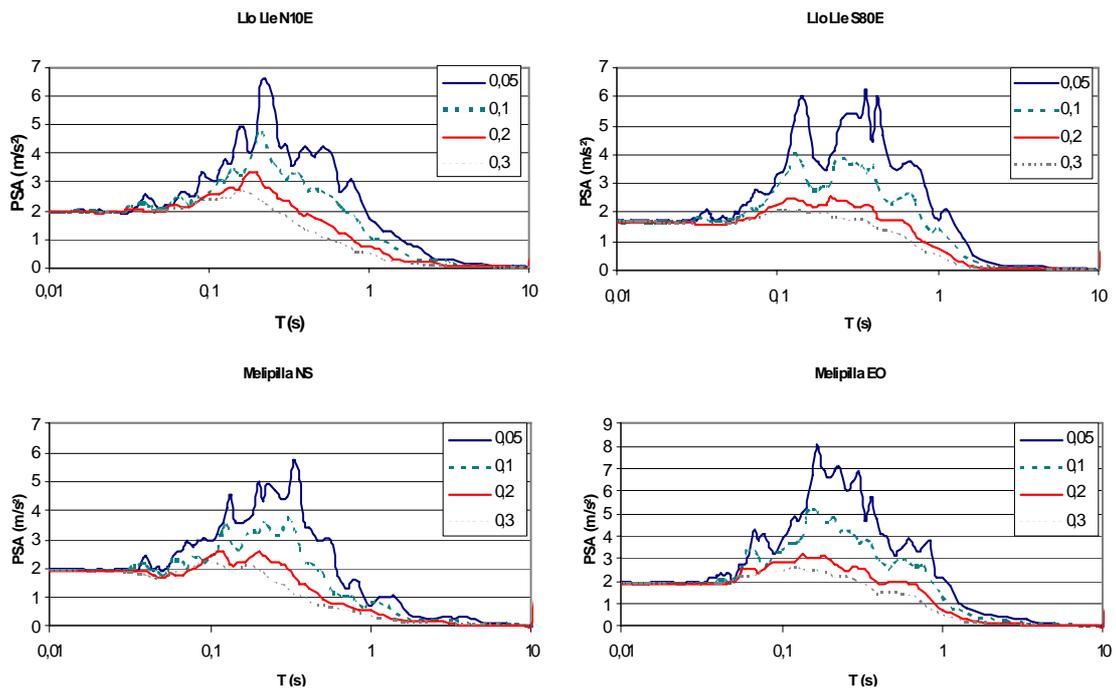


Figura 9: Pseudoaceleraciones de los registros sísmicos utilizados

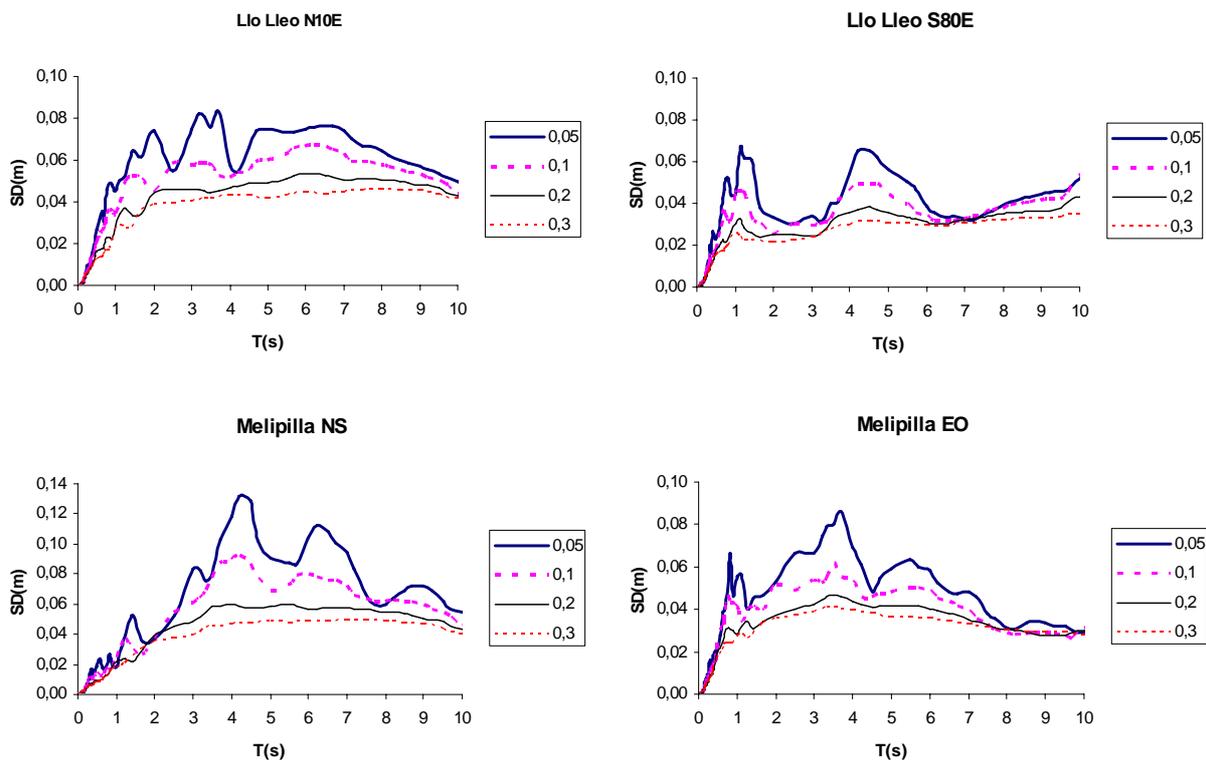


Figura 10: Espectros de pseudodesplazamientos

6 RESULTADOS, REDUCCIONES DE RESPUESTA

Distintas alternativas de sistemas de disipación son posibles en función de los requerimientos (p.e. perfil de reducciones ó de la variable de control deseable) y variadas opciones fueron consideradas, aunque en este trabajo se hace referencia a un caso para efectos demostrativos.

Para aumentar la capacidad de disipación es posible armar baterías de disipadores consistentes en varios módulos disipadores en paralelo. Se colocan 6 módulos disipadores en paralelo por sobre Cielo de Piso 16 (CP16) y CP19 y baterías de 2 VWD por sobre los CP22, CP25, CP28, CP31, CP34, CP37, CP40, CP43, CP46 y CP49 en ambos planos laterales YZ. Para lograr disipación en la dirección X se procede en forma similar colocando baterías de disipadores similares en la misma ubicación pero en el plano XZ y con la ayuda de una diagonal contenida en ese plano. El aumento promedio de amortiguamiento modal de los primeros 30 modos fue de 4.5% de acuerdo con los cálculos lineales.

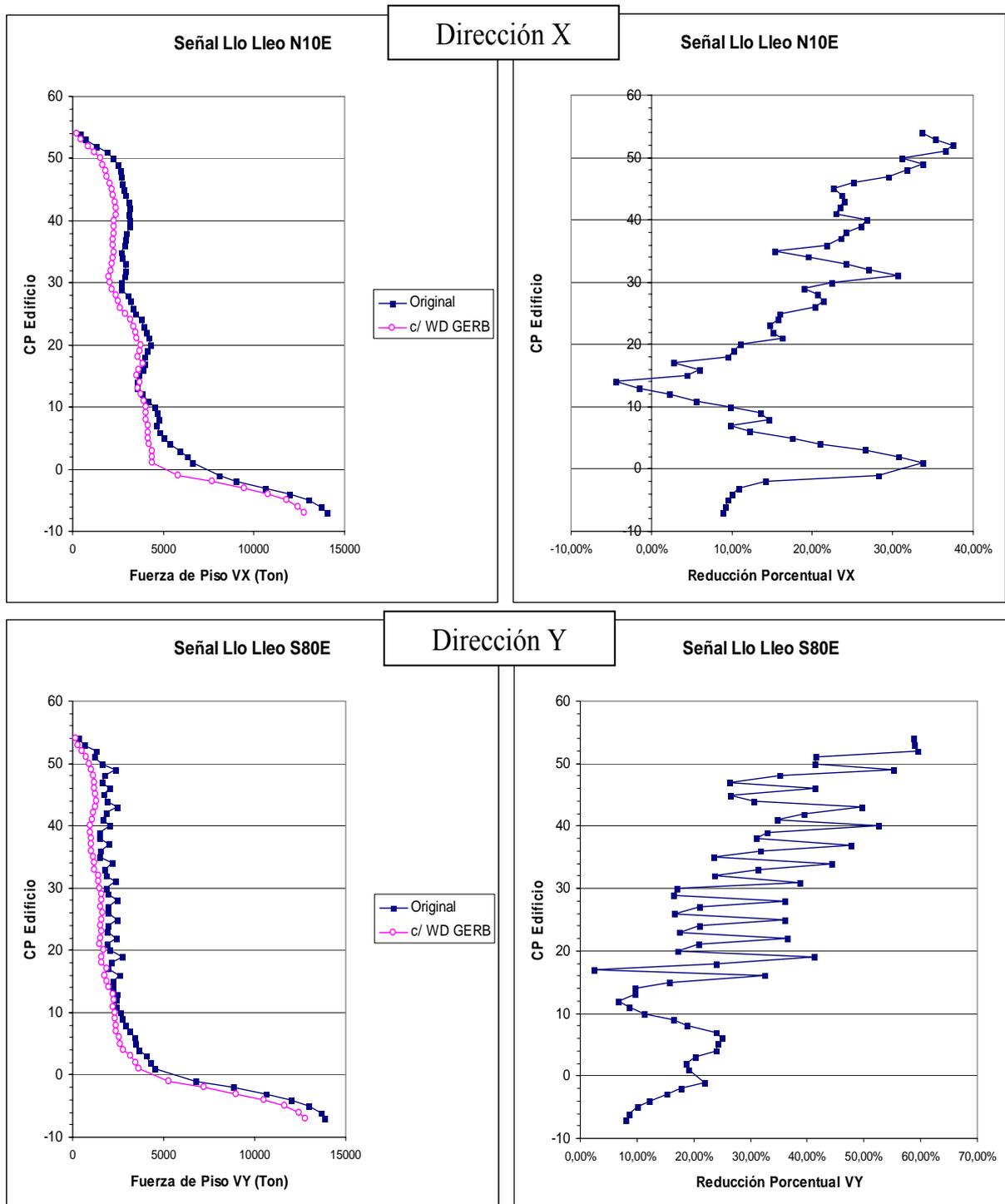


Figura 11-A: Fuerzas cortantes de piso, modelo sin y con disipadores

En las Figuras 11-A y 11-B se muestran las fuerzas cortantes de piso según las direcciones X e Y para los registros sísmicos considerados. En todos los casos la figura izquierda provee los valores absolutos máximos en toda la historia del tiempo para los distintos pisos, mientras que la figura derecha muestra además la reducción porcentual obtenida a partir del modelo original sin disipadores y mediante el empleo de éstos. Valores crecientes en altura de reducción de fuerzas de hasta 40-60% son obtenidos mediante el esquema de disipación propuesto.

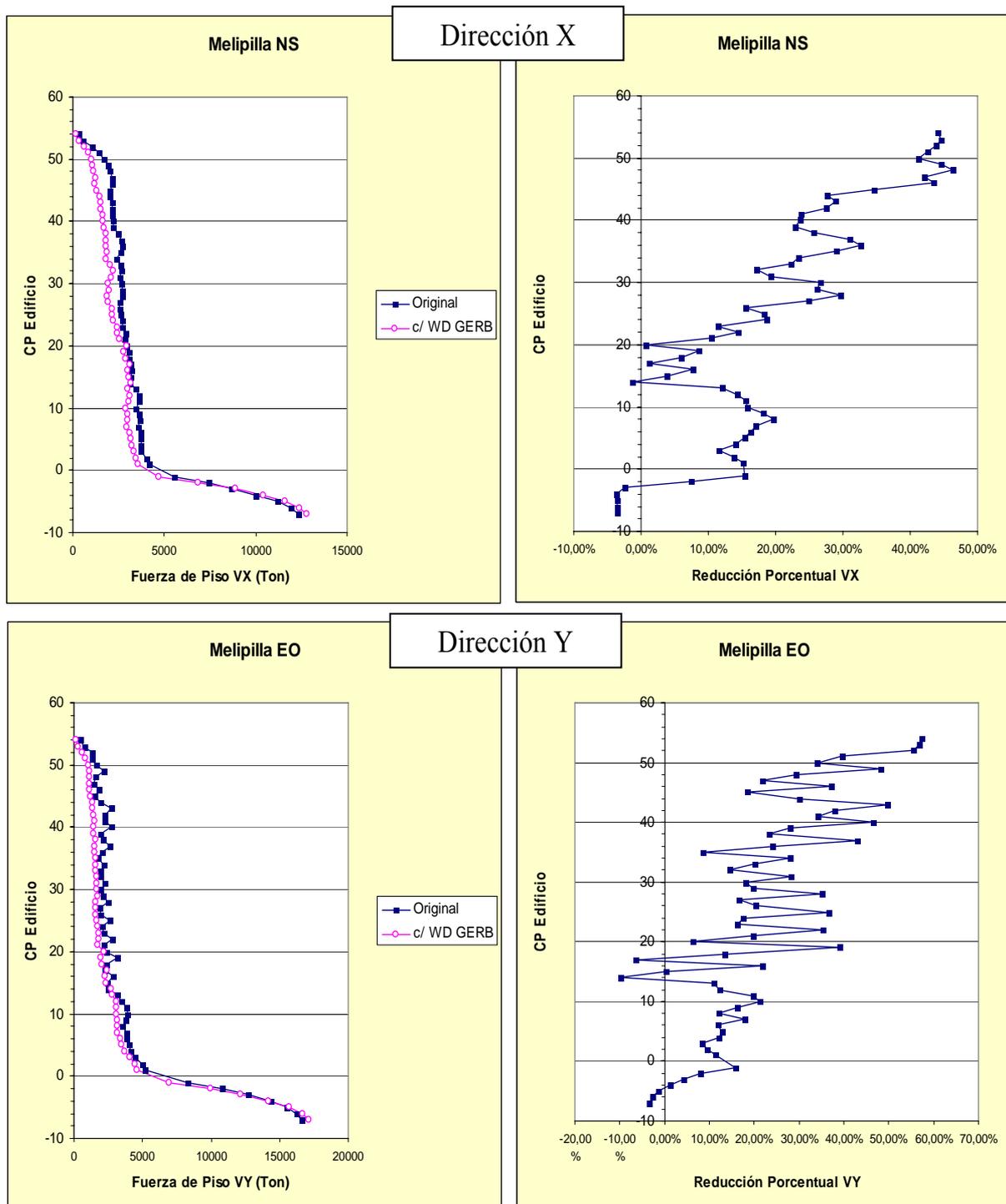


Figura 11-B: Fuerzas cortantes de piso, modelo sin y con disipadores

El drift de entrepiso máximo para las señales consideradas se observa en las Figuras 12-A y 12-B. De la misma manera el gráfico de la derecha indica la reducción porcentual de esta variable obtenida por la inclusión de los disipadores. Se observan reducciones de 20-40% y una eliminación de los picos máximos en altura del edificio del sistema sin disipación.

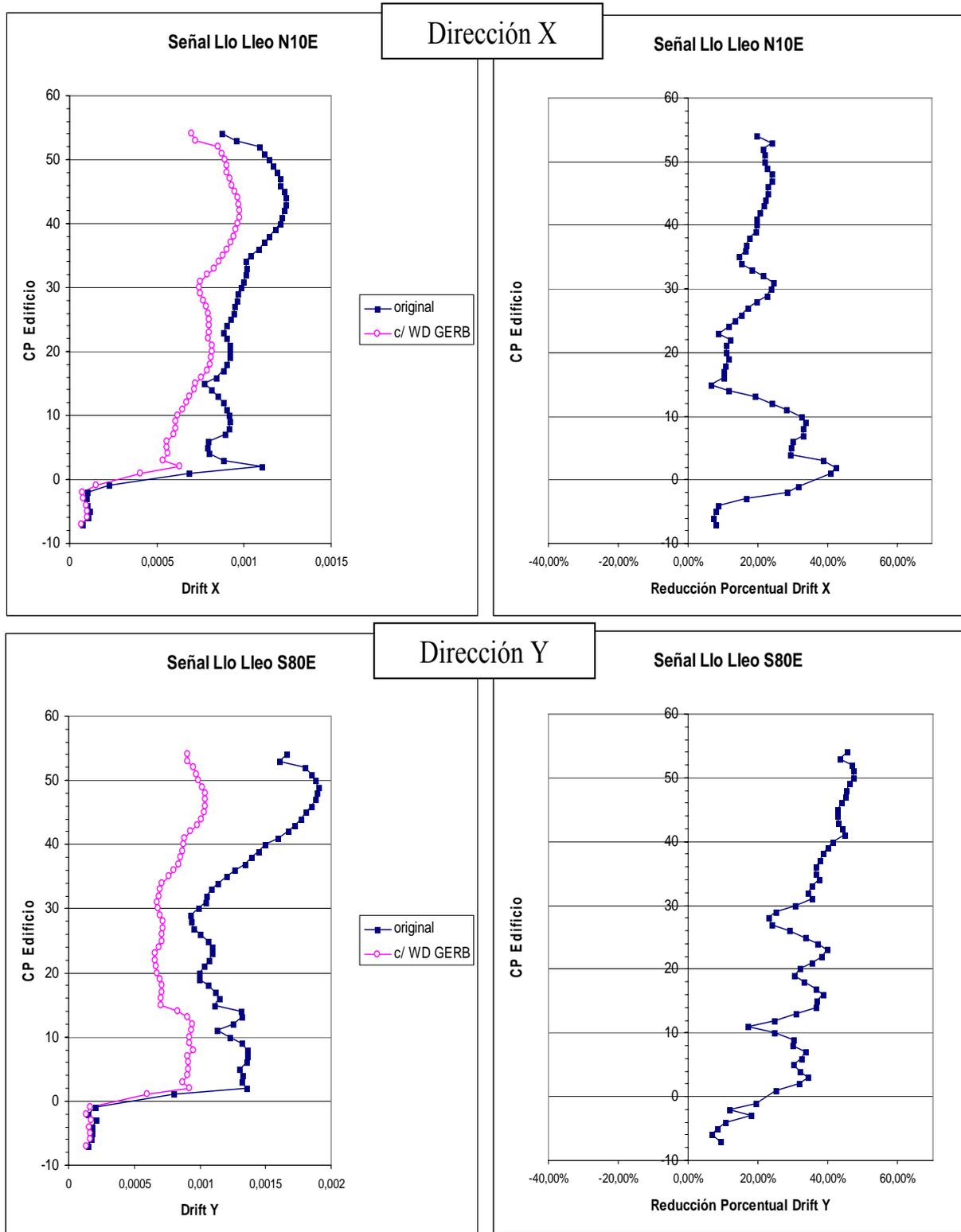


Figura 12-A: Drift de entrepiso, modelo sin y con disipadores

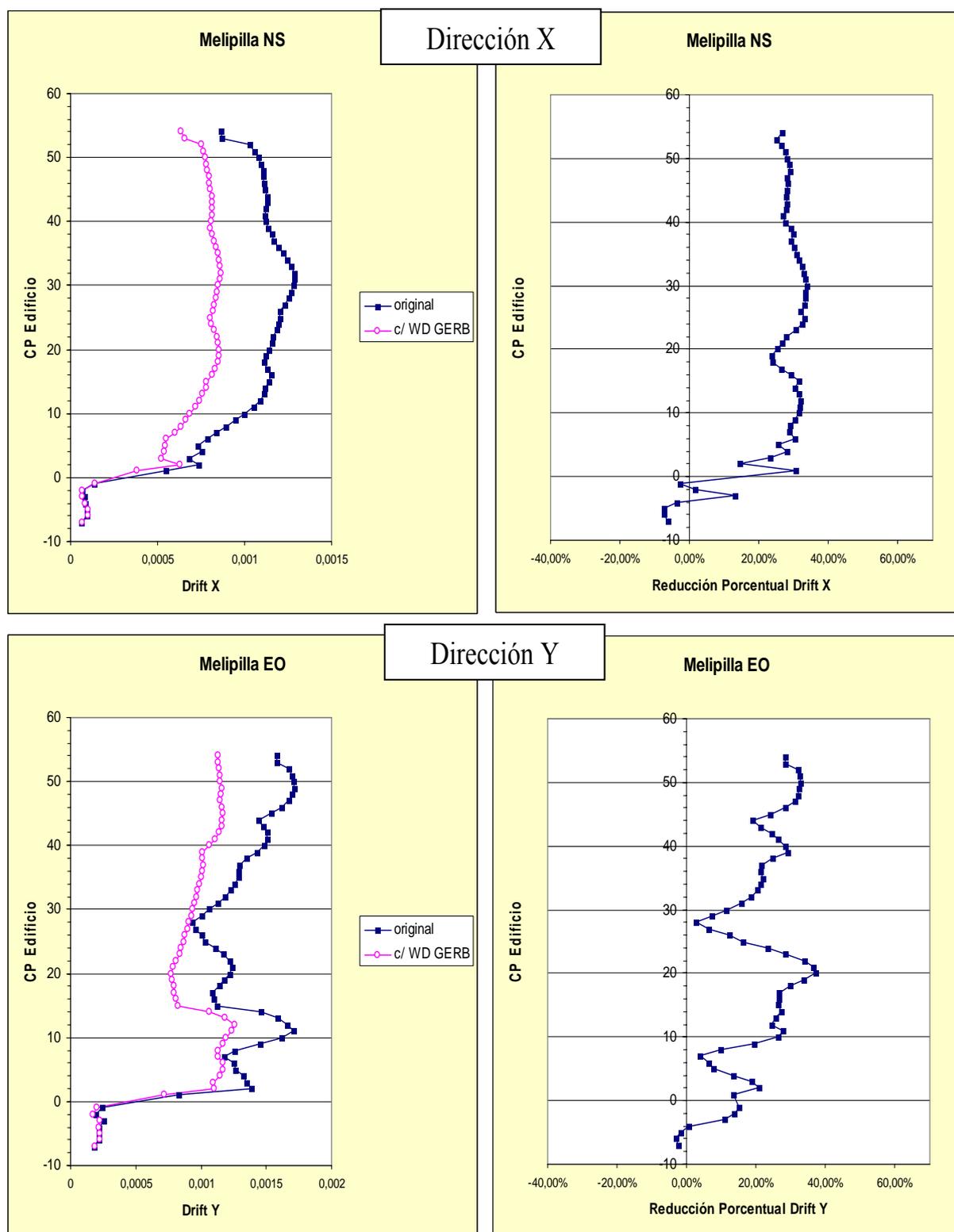


Figura 12-B: Drift de entresuelo, modelo sin y con disipadores

Finalmente en la Figura 13 se muestran las aceleraciones de un punto vértice en la planta superior (CP52) para los modelos propuestos. Las reducciones de aceleraciones máximas obtenidas son del 24 % y 67 % para las direcciones X e Y del sismo Llo Lleo y del 37 % y 25 % para las mismas direcciones y el sismo Melipilla.

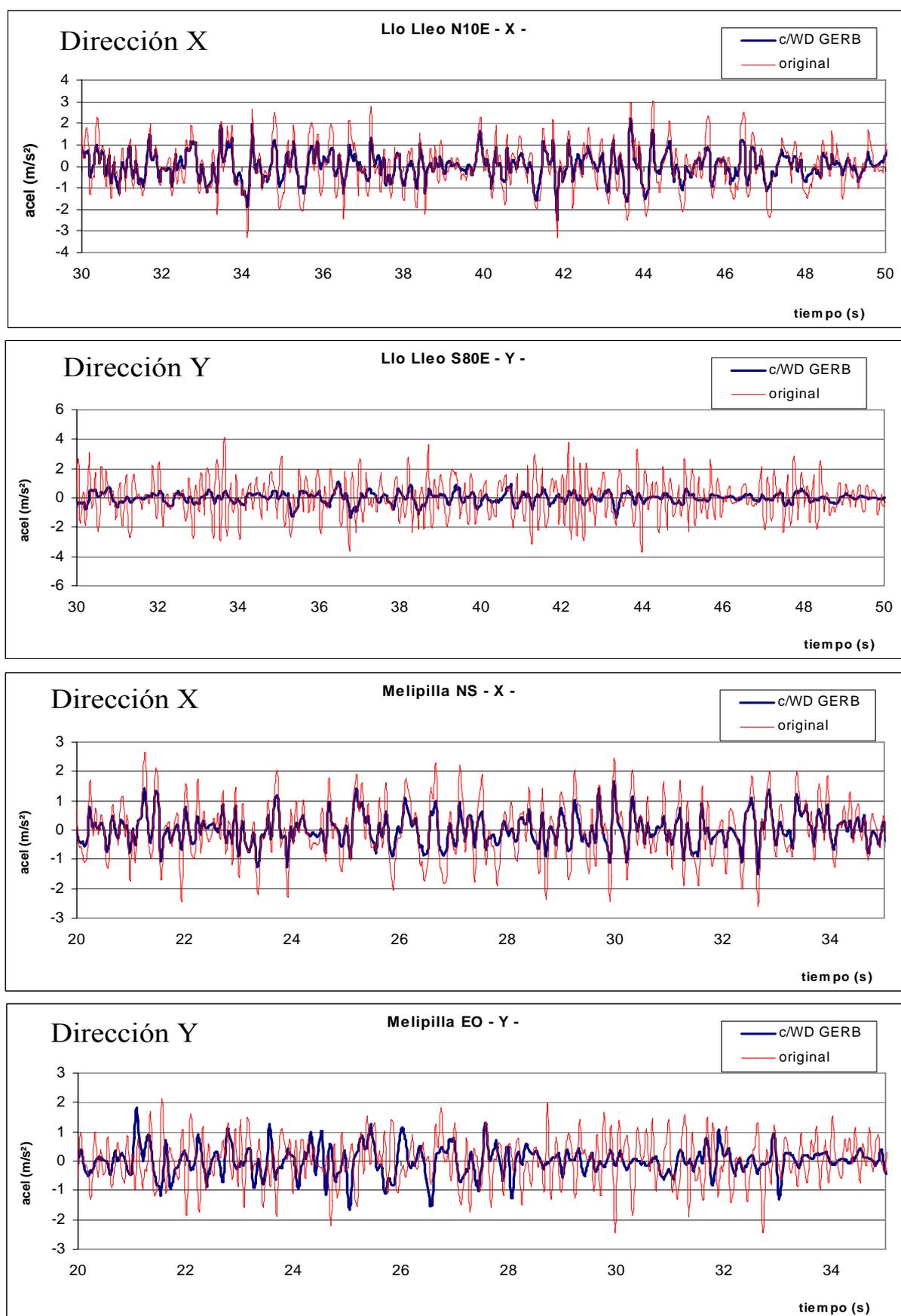


Figura 13: Aceleraciones en la cima del edificio, modelo sin y con disipadores

7. CONCLUSIONES

Independientemente del tipo de dispositivo disipador considerado, el consumo de energía adicional en los dispositivos agregados reduce la respuesta estructural, los desplazamientos y el drift de entrepiso. Los esfuerzos cortantes resultan en general para todos los disipadores menores, cuando son comparados con la protección mediante el pórtico tradicional rigidizado con diagonales (braced frame). Sin embargo, para los disipadores de fluencia de metal p.e., el cortante es a menudo aumentado respecto del edificio original, y dependiendo del tipo de disipador y de varios factores de diseño (Foti, et al., 1998).

La capacidad del sistema de disipación VWD para el control efectivo de los desplazamientos y distorsiones, aún disminuyendo los esfuerzos cortantes, se ha verificado en un edificio de elevada altura. Además de las características particulares citadas en este trabajo, los VWD presentan una mínima componente de resistencia en fase con los desplazamientos. Ya que las fuerzas viscosas están mayormente en cuadratura con las fuerzas elásticas y las inerciales, su inclusión no cambia significativamente los tradicionalmente definidos modos y frecuencias propias.

En un edificio de 52 plantas, 192 m de altura y 120.000 m² provisto con 64 módulos de disipación viscosa VWD resulta posible reducir el drift de entrepiso en un 20-40 % promedio, eliminando los picos máximos del perfil en altura y obteniendo una distribución más constante de esta variable en altura. Asimismo, las fuerzas cortantes de piso se reducen hasta un 50-60%, mientras que el cortante a nivel de suelo disminuye un 25 % promedio para la señal Llo Lleo y un 15 % para Melipilla. Las aceleraciones máximas en la cima del edificio se reducen en un 45 % y un 3 0% promedio para las citadas señales sísmicas, respectivamente.

Para obtener los resultados se utilizó un modelo de cálculo en el dominio del tiempo que considera la variación no lineal de la fuerza viscosa con la velocidad y la no proporcionalidad del amortiguamiento introducido. Sin embargo el diseño de estos sistemas de disipación puede ser realizado mediante la linealización de la respuesta del disipador en el rango de velocidades de trabajo y la utilización del esquema de cálculo propuesto simplificado, basado en el método de espectros de respuesta. Esto último adquiere especial relevancia en estructuras de gran tamaño y modelos con un elevado número de grados de libertad, donde pierden aplicabilidad los métodos relativamente complejos de optimización y control.

De los numerosos gráficos presentados resulta clara la conveniencia de utilizar un esquema de disipación VWD y la mejora en el comportamiento sísmico del edificio teniendo en cuenta los excelentes niveles de reducción de esfuerzos, distorsiones y aceleraciones.

REFERENCIAS

- Bergman, D.M. and Goel, S.C., Evaluation of cyclic testing of steel-plate devices for added damping and stiffness, *Report UMCE 87-10, Civil Engineering Department, University of Michigan*, 1987.
- Bozzo, L.M.; Cahis, X., Torres LI, A shear type energy dissipater for the protection of masonry infill walls, *Proceedings of the Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, 1998.
- Cahis, X; Bozzo, L.M.; Torres, L, Experimental Studies of various innovative energy dissipation devices, *Proceedings of Eleventh European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, France, 1998.
- Foti, D., Bozzo L. y López Almansa F., Numerical efficiency assessment of energy dissipators for seismic protection of buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27:543-556, 1998.

- Hanson, R.D., Aiken, I.D., Nims, D.K., Richter P.J. and Bachman R.E., State of the art and state of the practice in seismic energy dissipation. *Proceedings of the Seminar of Seismic Isolation, Passiv Energy Dissipation, and Active Control, Applied Technology Council*, 2:449-471, 1993.
- Jara, J.M., Estado del arte sobre dispositivos para reducir daños provocados por temblores, *Revista de Ingeniería Sísmica*, México, 47:35-79, 1994.
- Kirekawa, A., Ito Y. and Asano K., A study of Structural Control Using Viscoelastic Material, *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, 4:2047-2054, 1992.
- Maldonado-Mercado, J. C, Passive and active control of structures, *Thesis MIT, Department of Civil and Environmental Engineering*, 1995.
- Miyazaki, M. and Mitsusaka, Design of a building with 20% or greater damping, *Proceedings of the 10WCEE*, Madrid, Spain, 1992.
- Newark, N.M. and Hall, W.J., Earthquake spectra and design. *Earthquake Engineering Research Institute*. Berkeley, California, 1981.
- Richter, P.J., Nims, D.K., D.K. Kelly, J.M., and Kallenbach, R.M., The EDR-energy dissipating restraint , a new device for mitigation of seismic effects. *Proceedings of the SEAOC 59th Annual Convention*, Lake Tahoe, 1990.
- Tsai, K.C. and Hong, C.P., Steel triangular plate energy absorber for earthquake resistant buildings, *Proceedings of the First World Congress on Constructional Steel Design*, México, 1992.
- Venzina, S., Prolux, P., Pall R. and Pall A., Friction dampers for aseismic design of Canadian Space Agency, *Proceedings of the 10WCEE*, pp. 4123-4128, Madrid, Spain, 1992.
- Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Thompson,C.L. and Alonso L.J., Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices, *Earthquake Spectra*, 7(4):563-604, 1991.
- Witting, P.R. and Cozzrelli F.A., Shape memory structural dampers: material properties, design and seismic testing, report NCEER-92-0013, NCEER, *State University of New York at Buffalo*, 1992.