

INFLUENCIA DEL AMORTIGUAMIENTO EN LA RESPUESTA DE ESTRUCTURAS CON AISLAMIENTO SISMICO DE BASE

Miguel E. Tornello^a, Mauricio Sarrazin A^b

^a*Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (Ceredetec). Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional,*

mtornell@frm.utn.edu.ar, <http://www.frm.utn.edu.ar>

^b*Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, sarrazin@ce.uchile.cl, <http://www.ingcivil.uchile.cl>*

Palabras Claves: Aislamiento sísmico, Disipación de energía, Respuesta sísmica.

Resumen. Actualmente las técnicas de aislamiento sísmico y disipación de energía constituyen herramientas eficientes para controlar y minimizar el daño de los terremotos sobre las construcciones civiles, las personas y sus contenidos. El objetivo del trabajo es estudiar la influencia del amortiguamiento en la respuesta de un edificio con aislamiento sísmico de base cuando el mismo se encuentra sujeto a movimientos tipo pulso o terremotos de falla cercana. Se plantea como hipótesis que el amortiguamiento del sistema de aislamiento tiene una incidencia importante en la respuesta estructural y más aún cuando los movimientos sísmicos contienen pulsos característicos. Se plantea de manera conceptual los distintos tipos de amortiguamiento y su validez frente a movimientos con características de falla cercana. Inicialmente el trabajo explicita las ecuaciones de la teoría de las estructuras aisladas para individualizar los parámetros relacionados con el coeficiente de amortiguamiento y el lineal equivalente; luego mediante un planteo analítico de las ecuaciones de movimiento, se varía el amortiguamiento dentro de un rango habitual para estructuras aisladas sísmicamente y se obtienen curvas que definen su influencia en la respuesta. Los resultados indican que valores de amortiguamiento comprendidos dentro de un nivel definido es recomendable para controlar los efectos de movimientos de falla cercana. Resultados preliminares estarían indicando que el concepto de amortiguamiento lineal equivalente puede no ser general, sobre todo para movimientos tipo pulso o terremotos de falla cercana.

1. INTRODUCCIÓN

Las respuestas dinámicas de las estructuras con aislamiento sísmico dependen de las características mecánicas de los sistemas de aislamiento y de la naturaleza de la excitación. Las propiedades mecánicas de ciertos dispositivos que pueden ser eficientes para mitigar la respuesta de la estructura sujetos a ciertos *inputs* pueden tener un efecto no deseado para movimientos con otras características. Los movimientos del terreno generados por los terremotos se diferencian el uno del otro en magnitud, fuente, características, distancia y dirección de ruptura y condiciones del suelo local, por citar algunos aspectos. La capacidad de las estructuras para disipar energía es central para controlar las demandas de desplazamientos. Para ello es posible proponer diferentes mecanismos de disipación de energía con el objeto de optimizar la respuesta estructural (ATC, 1993). Entre dichos dispositivos es posible citar los del tipo viscoso, rígido y plástico, elasto plástico, visco plástico o combinaciones entre ellos.

Frente a excitaciones sísmicas de larga duración, la estructura está sujeta a severos ciclos de vibración forzada y la respuesta depende principalmente de la cantidad de energía que se disipa durante cada ciclo, área bajo el lazo fuerza-desplazamiento, más que de la naturaleza de la fuerza disipadora que se genera (viscosa, fricción, enasto plástica o visco plástica). Por tal motivo las propiedades de disipación de las estructuras se realiza, tradicionalmente, como un promedio de un ciclo del movimiento y expresadas en términos de relaciones adimensionales, concepto que proviene de la teoría lineal de la dinámica estructural (Clough y Penzien, 1993 – Chopra, 1995).

Durante los últimos años, una creciente base de datos de acelerogramas de terremotos registrados en todo el mundo han demostrado que las características cinemáticas de movimientos del suelo cercanos a la falla contienen pulsos largos de desplazamientos que pueden variar entre 50 cm. y 150 cm. con picos de velocidades que alcanzan valores de 500 cm/seg. en algunos casos y en otros mayores. Los citados pulsos pueden individualizarse con claridad en la historia de desplazamientos y velocidades y con menos notoriedad en la historia de aceleraciones. Los registros de aceleraciones, en proximidad a la falla, contienen picos de alta frecuencia evidenciando pulsos de periodos largos con algunas variaciones de alta frecuencia en la historia de velocidades y desplazamientos (Anderson et al. 1986, Campillo et al. 1989, Iwan y Chen, 1994).

El desafío de proveer protección sísmica para los citados movimientos se basa en la selección de las propiedades mecánicas del dispositivo de protección capaz de mejorar la respuesta de la estructura sujeta a las características de los movimientos próximos a la falla. Estudios previos (Anderson et al, 1986; Hall et al., 1995; Iwan, 1998) indicaron que los movimientos de falla cercana son, para algunas estructuras, particularmente destructivos precisamente debido a la presencia del pulso de larga duración más que al valor de aceleración máxima del registro. El efecto de pulso largo viene acompañado de valores importante de velocidad, los cuales deben ser eficientemente disipados por los mecanismos de protección. Las características de tales registros impusieron, en los últimos años, un nuevo desafío para los sistemas de aislamiento sísmico. Algunos trabajos (Tornello M., Sarrazin M, 2007, Stuardi et al., 2005, Jangid et al., 2001) mostraron que el aislamiento sísmico es una estrategia de protección eficaz aún para movimientos de falla cercana en la medida que sea provisto un adecuado mecanismo disipador de energía.

El trabajo analiza el comportamiento de un mecanismo de disipación para reducir la respuesta de estructuras aisladas sujetas a movimiento de falla cercana. El mecanismo presenta la posibilidad de variar el valor del amortiguamiento situación que permite encontrar las respuestas en términos de aceleraciones y desplazamientos en la medida que se varié el amortiguamiento del dispositivo de aislamiento.

El trabajo concluye que la combinación de dispositivos que provean un comportamiento de

fuerza elástica con amortiguamiento viscoso resulta una estrategia atractiva porque reduce sustancialmente el desplazamiento sin un incremento importante del corte en la base y de la aceleración en la superestructura.

2. TIPOS DE AMORTIGUAMIENTO

La ecuación de movimiento para sistemas traslacionales de un solo grado de libertad es representada por la ecuación (1), mientras que el factor de amortiguamiento o razón de amortiguamiento ξ se define por la ecuación (2).

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t) \quad (1)$$

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_o} = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c\omega_n}{2k} \quad (2)$$

En las expresiones anteriores se destaca:

- c : Coeficiente de amortiguamiento del sistema.
- k : Rigidez del sistema.
- m : Masa del sistema.

El amortiguamiento crítico c_c , se define por la expresión (3) y la razón de amortiguamiento ξ , puesto en función del mismo, por la (4).

$$c_c = 2m\omega_o = 2\sqrt{km} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{c}{c_c} \quad (4)$$

Los tipos de amortiguamiento que se utilizan en los diseños de dispositivos de disipación de energía, se encuentran referidos al amortiguamiento viscoso, el cual puede resumirse muy brevemente con el siguiente concepto. Cuando un líquido viscoso fluye alrededor de un émbolo en un cilindro (Figura 1), la fuerza de amortiguamiento que se genera es proporcional a la velocidad relativa entre los dos límites que confinan al líquido.

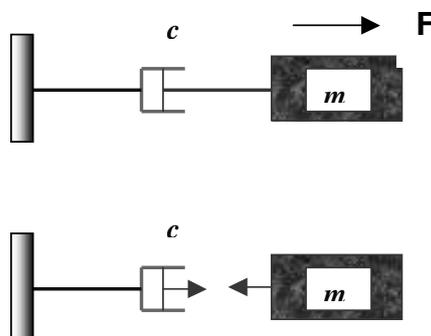


Figura 1: Representación de un amortiguador viscoso.

En la Figura 1 el pistón se desplaza con una velocidad \dot{x} respecto de la carcasa del cilindro, la cual está fija. La magnitud de la fuerza del amortiguador F , siempre actúa en la

dirección opuesta a la velocidad. La magnitud de la fuerza del amortiguador $F(\dot{x})$ es una función no lineal de la velocidad o bien puede considerarse aproximadamente una función lineal de la misma, lo cual depende de la construcción del amortiguador y del rango de velocidades. En el caso lineal, la relación se expresa según se indica en la ecuación (5).

$$F_{(\dot{x})} = c \dot{x} \quad (5)$$

Donde c , es el coeficiente de amortiguamiento definido anteriormente. Para el caso de un amortiguador viscoso, no lineal, definido por una función $F(\dot{x})$, el amortiguamiento viscoso lineal equivalente, próximo a una velocidad de operación $\dot{x} = \dot{x}_l$, se determina con la expresión (6) y la energía disipada por un amortiguador viscoso lineal con la (7)

$$c_e = \left. \frac{dF(\dot{x})}{d\dot{x}} \right|_{\dot{x}=\dot{x}_l} \quad (6)$$

$$E_d = \int F_D dx = \int F_D \dot{x} dt = \int c \dot{x}^2 dt = c \int \dot{x}^2 dt \quad (7)$$

Además del amortiguamiento viscoso existen otros, como el amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco, amortiguamiento por fluido o del cuadrado de la velocidad y amortiguamiento estructural o del material. Los dos primeros son amortiguamientos no lineales, mientras que el estructural es lineal. Es habitual relacionar los tres modelos de amortiguamiento con el modelo de amortiguamiento viscoso por medio de una cantidad llamada amortiguamiento viscoso equivalente c_{eq} , que es el valor del coeficiente de amortiguamiento c , que se requiere para disipar la misma cantidad de energía por periodo de oscilación armónica forzada (Balachandran, B., et al, 2005).

En un sistema vibratorio, las fuerzas asociadas a la rigidez y a la inercia son conservativas, por lo tanto el trabajo que efectúa cada una de las fuerzas en cada uno de los ciclos de oscilación forzada es cero, en consecuencia, si se desea determinar la disipación de energía en un sistema vibratorio sólo debe ponerse atención en el amortiguador o en la fuerza de disipación, F_D . El valor de la energía disipada queda expresado por la ecuación (7).

Para excitaciones armónicas de sistemas lineales, después de que los transitorios se extinguen, las respuestas de desplazamiento y velocidad tienen la forma que indican las ecuaciones (8). En dicho grupo de ecuaciones el periodo de las respuestas de desplazamiento y de velocidad es $2\pi/\omega$, mientras que ω es la frecuencia de la fuerza. Cuando se admite un modelo de amortiguamiento viscoso lineal, la fuerza disipativa viene dada por la ecuación (5). Si se sustituye dicho valor en la ecuación (7), la energía disipada resulta la cantidad indicada en la (9).

$$\begin{aligned} x_{(t)} &= X_o \text{sen}(\omega t - \phi) \\ \dot{x}_{(t)} &= \omega X_o \text{sen}(\omega t - \phi) \end{aligned} \quad (8)$$

$$E_{viscoso} = c \int_0^{2\pi/\omega} \dot{x}^2(t) dt \quad (9)$$

Si en la última ecuación se reemplaza la respuesta en términos de velocidad, del grupo de ecuaciones (8), la energía disipada puede expresarse como indica la ecuación (10).

$$E_{vis\cos o} = c\omega^2 X_o^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2(\omega t - \phi) dt = c\pi\omega X_o^2 \quad (10)$$

Esta última ecuación indica que la energía disipada es linealmente proporcional al coeficiente de amortiguamiento c , a la frecuencia de excitación ω y al cuadrado de la amplitud del desplazamiento X_o . Los sistemas de protección sísmica, entre ellos los de aislamiento sísmico permiten modificar los tres parámetros mejorando la cantidad y calidad de la energía disipada. Por lo tanto y con relación a los objetivos del presente trabajo, se concluye, que el amortiguamiento incide en la respuesta de las estructuras con protección sísmica.

Para otros modelos de amortiguamiento también es posible cuantificar la energía disipada a través del amortiguamiento viscoso equivalente c_{eq} (Balachandran, B., et al, 2005). Para el caso de amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco, la energía disipada ($E_{Coulomb}$) es proporcional al coeficiente cinético de fricción μ , a la carga normal, $N = m.g$, y a la amplitud del desplazamiento X_o (ecuación 11), mientras que el coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente es inversamente proporcional a la frecuencia de excitación y a la amplitud de la respuesta de desplazamiento X_o (ecuación 12).

$$E_{Coulomb} = 4\mu m g X_o \quad (11)$$

$$c_{eq} = \frac{4\mu m g}{\pi\omega X_o} \quad (12)$$

El modelo de amortiguamiento de Coulomb es utilizado por dispositivos basados en aisladores friccionales. Si bien el presente trabajo evalúa la influencia del amortiguamiento en sistemas de aislamiento sísmico basados en dispositivos visco elásticos, es importante destacar algunas características del amortiguamiento en dispositivos friccionales ampliamente utilizados.

Una de las principales desventajas de los aisladores friccionales radica en la incertidumbre de evaluar el coeficiente cinético de fricción μ , debido al envejecimiento, abrasión y uso de los dispositivos (De la Llera J. et al., 1998; Al-Hussaini T. et al., 1994). Esta situación pone en duda, a través del tiempo, la magnitud de la energía disipada y del amortiguamiento viscoso equivalente (ecuación 11 y 12). Trabajos realizados por Constantinou en los años '90 indicaron que el coeficiente de fricción es función de la velocidad máxima y mínima del movimiento del suelo y de la presión de contacto y condición de la superficie del dispositivo friccional, situación que obliga a considerar en los diseños de dispositivos de aislamiento, un valor de μ constante en el tiempo (Constantinou M. et al., 1990). Este hecho aumenta aún más la incertidumbre citada.

Para amortiguamiento por fluido, la energía disipada es proporcional a un coeficiente c_d , el cual depende del área de la masa del líquido en una dirección normal y de la densidad de la masa del fluido; del cuadrado de la frecuencia de excitación y del cubo de la amplitud de desplazamiento X_o (ecuación 13), mientras que el coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente es proporcional a la frecuencia de excitación y a la amplitud de la respuesta (ecuación 14).

$$E_{\text{fluido}} = \frac{8}{3} c_d \omega^2 X_o^3 \quad (13)$$

$$c_{eq} = \frac{8 c_d \omega X_o}{3\pi} \quad (14)$$

2.1 Razón de amortiguamiento modal y coeficiente de amortiguamiento efectivo. Estructuras con aislamiento sísmico

Con el objeto de representar la capacidad de una estructura para disipar energía se proponen distintas expresiones de amortiguamiento adimensionales. En la presente sección se revisan las definiciones de las dos relaciones más frecuentemente utilizadas como es la razón de amortiguamiento modal ξ_i y el coeficiente de amortiguamiento efectivo β_{eff} .

Para sistemas vibratorios lineales de un grado de libertad, con masa m , rigidez k y amortiguamiento viscoso c , la razón de amortiguamiento viscoso se cuantifica con la ecuación (2).

Para sistemas de un grado de libertad hay solamente un modo, $\xi = \xi_1$. Para movimiento armónico con amplitud, U_o , y frecuencia, Ω , la constante c de amortiguamiento puede ser expresada en función de la energía disipada por ciclo, W_D mediante la ecuación (15).

$$c = 2 \xi m \omega_o = \frac{W_D}{\pi \Omega U_o^2} \quad (15)$$

Donde W_D es el área encerrada por el lazo fuerza – desplazamiento. Entonces el coeficiente de amortiguamiento, ξ , puede expresarse según se indica en la ecuación (16).

$$\xi = \frac{\omega_o W_D}{4 \pi \Omega E_s} \quad (16)$$

Cuando la frecuencia de vibración del sistema de un grado de libertad resulta ser la frecuencia natural del oscilador (resonancia), la razón de amortiguamiento modal queda expresada por la ecuación (17). La misma es una expresión conocida y presentada en muchos textos de dinámica de estructuras y suelos (Chopra, 1995; Kramer, 1996).

$$\xi = \frac{W_D}{4 \pi E_s} \quad (17)$$

Con el desarrollo de dispositivos de aislamiento sísmico y disipación de energía, la ingeniería estructural tuvo que afrontar la necesidad de cuantificar la capacidad de disipación de energía de los componentes de aislamiento. El método más frecuente para cuantificarla es a través de los ciclos de desplazamientos, $U_{(t)} = U_o \text{sen } \Omega t$, en el dispositivo de aislamiento midiendo la fuerza que desarrolla. La energía disipada por ciclo es el área encerrada por el lazo fuerza – desplazamiento y el coeficiente de amortiguamiento efectivo que provee el dispositivo se cuantifica con la ecuación (18).

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{2 \pi K_1 U_o^2} \quad (18)$$

Para un sistema de un grado de libertad (Figura 2), compuesto por una masa, m sobre un dispositivo de aislamiento de rigidez efectiva $K_1 = m \omega_1^2$, la razón de amortiguamiento puede determinarse trabajando con las expresiones (16) y (18), ecuación (19).

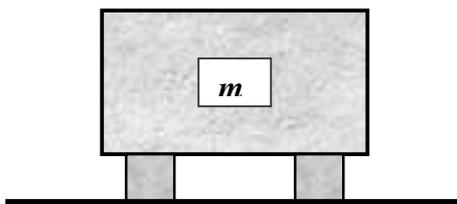


Figura 2: Modelo de un grado de libertad (1GL) sobre un sistema de aislamiento sísmico.

$$\xi = \xi_1 = \frac{\omega_1}{\Omega} \beta_{eff} \quad (19)$$

Donde: $\omega_1 = \sqrt{\frac{K_l}{m}}$ y $\Omega =$ Frecuencia de oscilación de la superestructura.

La ecuación (19) permite determinar el amortiguamiento modal del sistema estructural con masa finita a partir del amortiguamiento efectivo, β_{eff} . Eventualmente durante un movimiento sísmico la superestructura puede oscilar próxima a la frecuencia natural, $\Omega \approx \omega_1$, por lo tanto la ecuación (19) prácticamente toma la forma, $\xi = \beta_{eff}$. Algunos trabajos de investigación relacionados con el amortiguamiento efectivo indican que para movimientos con presencia de pulsos de aceleración, velocidad y desplazamientos, el valor de la razón de amortiguamiento se aleja del amortiguamiento efectivo (Makris N. et al., 1998).

Si se considera ahora un sistema de dos grados de libertad con aislamiento de base (Figura 3), la frecuencia de la estructura aislada se determina con la ecuación (20) y el amortiguamiento con la (21).

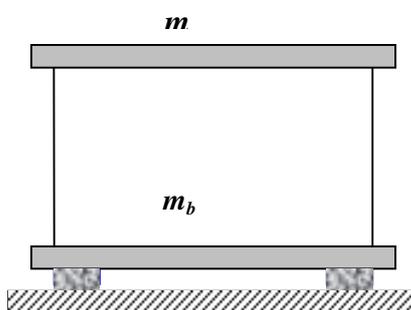


Figura 3: Modelo de dos grados de libertad (2GL) sobre un sistema de aislamiento sísmico.

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K_l}{(m_b + m)}} \quad (20)$$

$$C_1 = 2\xi_1 (m_b + m)\omega_1 \quad (21)$$

El modelo de la Figura 3 posee dos modos, dos frecuencia modales y dos razones de amortiguamiento modales. Los valores pueden determinarse mediante el grupo de ecuaciones (22) y (23) (Kelly J., 1997).

$$\omega_l = \omega_1 \sqrt{1 - \gamma \frac{\omega_l^2}{\omega_s^2}} \quad \xi_l = \xi_1 \left(1 - \frac{3}{2} \gamma \frac{\omega_l^2}{\omega_s^2} \right) \quad (22)$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_s}{\sqrt{1-\gamma}} \sqrt{1 + \frac{\omega_1^2}{\omega_s^2}} \quad \xi_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\gamma}} \left(\xi_s + \xi_1 \frac{\omega_1}{\omega_s} \right) \left(1 - \frac{1}{2} \gamma \frac{\omega_1^2}{\omega_s^2} \right) \quad (23)$$

En las expresiones anteriores:

$$\gamma = \frac{m}{(m + m_b)}$$

Debido a la presencia de dispositivos de aislamiento, la participación del primer modo es dominante por lo tanto en una estructura con dos grados de libertad el conjunto oscilará predominantemente en el primer modo con una razón de amortiguamiento dada por la ecuación (24).

$$\xi_1 = \frac{W_D \omega_1}{4\pi E_s} = \beta_{eff} \omega_1 \approx \xi_s \quad (24)$$

El coeficiente de amortiguamiento efectivo de la mayor parte de los sistemas de aislamiento es independientemente de la frecuencia, por lo tanto desde el punto de vista práctico se asume que $\xi_l = \beta_{eff}$. Esta igualdad podría verse modificada cuando el movimiento sísmico acuse la presencia de pulsos largos de desplazamientos (Makris N. et al., 1998).

Nuevamente y con relación al objetivo del presente trabajo, las últimas ecuaciones indican la influencia del amortiguamiento en la respuesta de estructuras con aislamiento sísmico.

3. DISPOSITIVO DE AISLAMIENTO SÍSMICO. ESTRUCTURA AISLADA.

Para evaluar la influencia del amortiguamiento en el comportamiento de estructuras con aislamiento sísmico se analizan las respuestas de un edificio de tres niveles con un aislamiento sísmico de base (Tornello et. al., 2004, 2005, 2006, 2007). El sistema de aislamiento está conformado por paquetes de resortes helicoidales de acero, con comportamiento perfectamente lineal y con baja rigidez en sentido horizontal y vertical (Gerb ®) (Figura 4.a). Para aumentar el amortiguamiento del conjunto aislado, los paquetes de resortes se instalan junto a amortiguadores visco-elásticos (Visco ®) (Figura 4.b)



Figura 4: (a) Paquetes de resortes helicoidales metálicos (Gerb ®),
(b) Amortiguadores visco-elásticos de eje vertical (Visco®).

El sistema presenta como característica una rigidez lineal, tanto horizontal como vertical y un amortiguamiento cuyo comportamiento se aproxima al lineal viscoso (Figura 5). Los aisladores poseen frecuencias propias horizontales bajas, de aproximadamente 1 a 1.5 Hertz y frecuencias propias verticales de aproximadamente 3 a 3.5 Hertz. El sistema con dichas propiedades dinámicas conduce a movimientos verticales y pendulares de la estructura aislada frente al movimiento del terreno. Las fuerzas y amplitudes horizontales se transforman en desplazamientos pendulares y verticales lo que permite reducir las fuerzas dinámicas en la superestructura (Stuardi et. al, 2005).

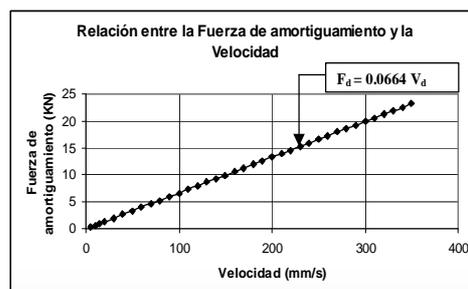


Figura 5: Relación lineal entre la fuerza máxima de amortiguamiento y el valor máximo de la velocidad.

Por lo tanto y atendiendo al comportamiento del sistema de aislamiento (resortes + amortiguadores visco elásticos), la respuesta estructural del edificio fue evaluada a través de una constitutiva lineal. Las características dinámicas del sistema de aislamiento utilizado para evaluar las respuestas se resumen en la Tabla 1.

Parámetro		Valor
Capacidad Nominal a Carga Vertical	N_u	768 KN
Rigidez Vertical	K_{lv}	29500 KN/m
Rigidez Horizontal	K_{lh}	3940 KN/m
Amortiguamiento horizontal	c_h	26%
Amortiguamiento vertical	c_v	13%

Tabla 1. Características del sistema de aislamiento (Gerb®).

Si se cambia el número de cilindros internos del amortiguador visco elástico puede variarse, dentro de un amplio margen, el amortiguamiento en las tres direcciones del movimiento del dispositivo de protección. Basado en esta propiedad, en el presente trabajo se han variado los valores de amortiguamiento, dentro de límites usuales, con el objeto de estudiar las respuestas del edificio con aislamiento en términos de aceleraciones y desplazamientos.

Trabajos realizados por Jangid R. en el 2001 sobre las respuestas de distintos dispositivos de aislamiento sísmico sujetos a terremotos de falla cercana, indican que para amortiguamiento comprendidos entre el 20% y 30% (y en algunos casos excepcionales, hasta el 40%) las aceleraciones en la superestructura se mantenían prácticamente constantes mientras que los desplazamientos mostraban una tendencia a disminuir (Jangid R. S. y Kelly J. M., 2001). Los terremotos utilizados para el análisis fueron solamente seis y los registros de aceleraciones fueron descompuestos en la dirección normal y perpendicular a la traza de la falla cercana. El presente trabajo utiliza once terremotos, sin realizar la descomposición realizada por Jangid R., y el rango de amortiguamiento utilizado para el estudio ha sido entre el 5% y el 75-85% (Figura 8 y 9).

El edificio emplazado por encima de los dispositivos de aislamiento es, principalmente, de hormigón armado y mampostería reforzada. Las fundaciones han sido resueltas con base corridas y vigas de fundación incorporadas, emplazadas a una cota (-200 a -250 cm.) respecto del terreno natural. Las losas están conformadas por placas prefabricadas de hormigón precomprimido, espesor 24 cm. con una capa superior de hormigón armado de 4 cm. de espesor y malla Ø4.2mm cada 25 cm. de tal manera de garantizar un elemento estructural monolítico y rígido a nivel de techo y entrepiso. Los muros de mampostería sismorresistentes son armados con espesores que varían entre los 20 y 30 cm.

Las demandas, tanto a cargas verticales como acción sísmica, se determinaron mediante un modelo espacial de elementos finitos (Figura 6) utilizando como herramienta el software SAP

(Sap2000, 2003), el cual posea rutinas que permiten una modelación adecuada de los dispositivos de aislamiento. Se realizaron distintos tipos de análisis para evaluar las respuestas del mismo, sin embargo en el presente trabajo se hará referencia a los resultados obtenidos del análisis dinámico temporal, no lineal, en el dominio del tiempo.

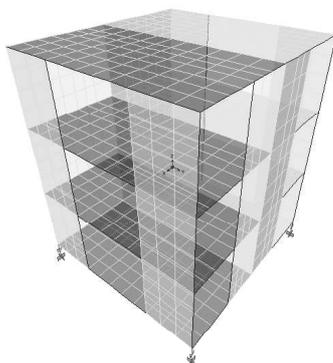


Figura 6: Modelo tridimensional (3D) en elementos finitos utilizado para evaluar las respuestas dinámicas del edificio.

La modelación del dispositivo del aislamiento ha sido realizada en SAP a través de la opción *Link/Support Properties*. Se ha seleccionado la opción *Damper* cuando se define el *Link-Support type*. Para el presente trabajo se ha despreciado el peso y la masa del sistema de aislamiento debido a que el mismo representa solamente el 0.78 % de la masa total cuando se admite una participación del 25% de las cargas accidentales (Tabla 3). Para cada una de las direcciones de análisis se asigna el valor de la rigidez del resorte y el coeficiente de amortiguamiento dado, en este caso, por la presencia del amortiguador visco elástico. Se define y admite un comportamiento lineal del dispositivo de aislamiento de acuerdo a lo indicado en el Figura 5.

La modelación de los dispositivos exige también definir la distancia entre la base del dispositivo de aislamiento, fijada a la estructura de fundación (por debajo del aislador) y el baricentro del mismo con el objeto de referir a dicho punto el resultado de la deformación por corte del conjunto aislado. El software entrega la respuesta utilizando la relación $f = k d_k = c \dot{d}_c^{exp}$, donde k es la rigidez del resorte, c el coeficiente de amortiguamiento, d_k la deformación del resorte y \dot{d}_c , es la deformación en el amortiguador (Wilson E., 2001).

La frecuencia del edificio con base fija fue estimada en 6.67 Hertz, mientras que los dispositivos de aislamiento sísmico permitieron bajar dicho valor a 1 Hertz. En tabla 2 se resumen los valores de masa del edificio con aislamiento sísmico en sus distintos niveles admitiendo una participación del 25% de las cargas accidentales.

Nivel	Masas (KN. s ² /m)
1	158.76
2	56.33
3	46.96
Total	262.05

Tabla 2. Masas del modelo para evaluar las respuestas dinámicas del edificio aislado.

4. TERREMOTOS UTILIZADOS PARA EVALUAR LAS RESPUESTAS

Existen evidencias que indican que la sacudida del suelo cercano a una falla sísmica se caracteriza por un movimiento impulsivo de corta duración que somete a las estructuras a un alto *input* de energía a pocos segundos de iniciado el movimiento. Este hecho sería poco relevante si se analiza en forma aislada y se admite que las fallas están alejadas de centros urbanos, sin embargo adquiere un tono dramático cuando se piensa que en los últimos años se ha producido un importante crecimiento de áreas urbanas en regiones sísmicamente activas.

Diversas investigaciones realizadas en los últimos años orientados a evaluar las características de registros de terremotos (Somerville, P. et al, 1996; Iwan, 1998; Alavi, B. et al, 2000; Baez, J. et al, 2000; Sasani, M. et al, 2000 entre otras) encontraron diferencias importantes entre registros de movimientos asociados a fallas cercanas de aquellos provenientes de fuentes más alejadas. Dichas diferencias implican una respuesta estructural distinta según sea la distancia a la fuente.

Uno de los primeros trabajos de investigación (Bertero et al, 1976) determinó que existían registros de terremotos que evidenciaban la presencia de pulsos de velocidad de larga duración, designados *pulsos largos*. Los mismos imponían desplazamientos importantes y, en muchos casos, permitieron explicar los mecanismos de falla de algunas estructuras ubicadas en proximidad a la fuente.

Después del terremoto de San Fernando de 1971 la importancia de los pulsos largos de velocidad sobre la respuesta estructural ha sido señalada por distintos trabajos de investigación (Bertero, 1976, Anderson, 1986). Luego del terremoto de Imperial Valley en 1979, Anderson y Bertero (1987) identificaron el aumento de velocidad como un importante parámetro que afecta la máxima respuesta inelástica de estructuras sometidas a terremotos de falla cercana.

Los estudios realizados por Heaton T. H., et al. en 1995 sobre la respuesta de los sistemas de aislamiento sísmico sometidos a terremotos de falla cercana, instalaron una serie de dudas sobre la implementación del aislamiento sísmico en edificios emplazados próximos a la falla. Por otro lado dichas investigaciones fueron tomadas por el código norteamericano UBC en su versión 1997, de tal manera que cuando se realiza el diseño de sistemas de aislamiento, emplazados en zonas cercanas a la falla, los mismos conducen a resultados por demás conservadores (UBC, 1997).

Sin embargo otras investigaciones (Jangid, R. S., et al, 2001; Maden G. et al, 2001) determinaron que si se controlan algunos parámetros del diseño de los sistemas de aislamiento la respuesta de los mismos, frente a terremotos de falla cercana, puede ser eficiente y satisfactoria.

La falta de instrumentación sísmica que existió durante muchos años concluyó en investigaciones con pocos registros de baja magnitud provenientes de estaciones registradoras distantes del epicentro. Por lo tanto, aspectos propios de terremotos altamente destructivos no pudieron visualizarse debido a que no se contaba con la información necesaria. En los últimos 20 años se han producido, en regiones de elevada peligrosidad sísmica, importantes terremotos en los que se registraron acelerogramas en zonas epicentrales. Entre los más relevantes se pueden citar los de Loma Prieta, EEUU, 1989; Landers, EEUU, 1992; Northridge, EEUU, 1994; Kobe, Japón, 1995; Chi Chi, Taiwan, 1999; Duzce, Turquía, 1999 (Frau et al, 2005).

El oeste de la República Argentina cuenta con importantes conglomerados urbanos, entre ellos el Gran Mendoza, ubicados en las proximidades de fallas activas que los exponen al fenómeno de terremotos de campo cercano. Los pocos registros disponibles dan cuenta de la presencia de este fenómeno sin embargo, la escasez de datos puede ser salvada, dentro de ciertos límites, por registros del oeste de los Estados Unidos (Saragoni, 2004).

En función de los antecedentes citados, el presente trabajo evalúa la respuesta del edificio con aislamiento sísmico con acelerogramas de terremotos que se conoce han producido daño y colapso en la zona epicentral. Las características de los mismos se resumen en Tabla 3.

Evento	Mag.	Tipo Suelo	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
Tabas Irán	7.4	Blando	0.85	121.40	94.60
Imperial Valley	6.9	Blando	0.78	45.90	14.90
Coalinga	5.7	Roca	1.08	39.70	5.40
Loma Prieta Corralitos	7.1	Firme	0.64	55.20	10.90
Loma Prieta Los Gatos	7.10	Firme	0.72	173.00	64.70
Cape Mendocino	7.0	Roca	1.50	127.40	41.00
Northridge Tarzana	6.7	Firme	1.78	113.60	33.20
Northridge Rinaldi	6.7	Blando	0.84	170.30	33.40
Kobe	6.9	Firme	0.82	81.30	17.70
Chi-Chi Taiwán	6.9	Firme	1.16	114.70	31.40
Duzce Turquía	7.3	Firme	0.97	36.50	5.50

Tabla 3. Características de los terremotos utilizados para evaluar la respuesta del edificio aislado.

El carácter impulsivo de algunos de los acelerogramas utilizados en el estudio del presente trabajo se puede observar en la Figura 7.

5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Existen pocos estudios sobre la respuesta de estructuras aisladas sísmicamente sujetas a terremotos de falla cercana y en algunos casos sus conclusiones son contradictorias. Las primeras investigaciones realizadas en dicho sentido (Heaton, T. H., et al., 1995) pusieron en duda la eficiencia de los sistemas de aislamiento sísmico emplazadas en zonas cercanas a las fallas.

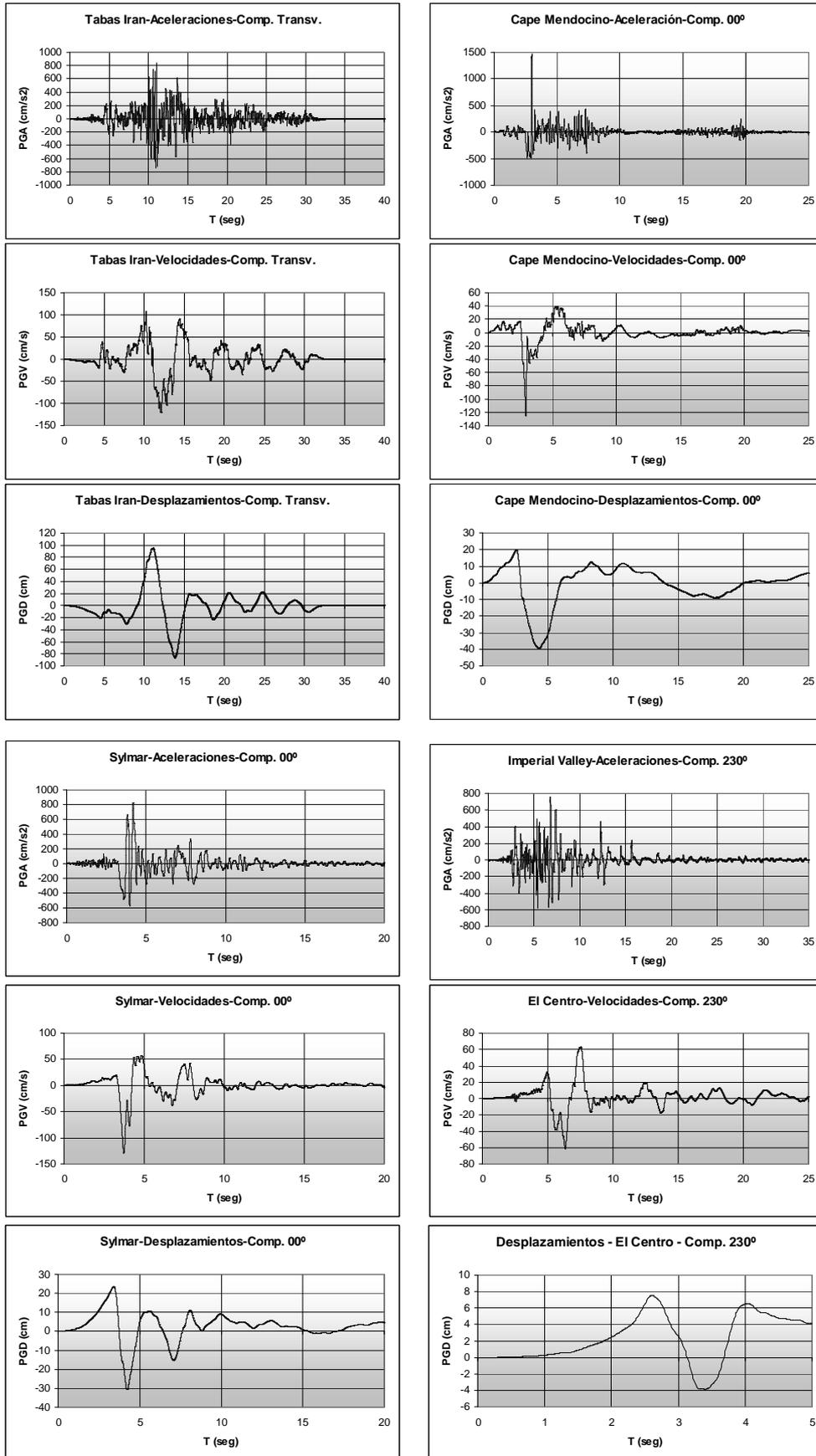


Figura 7: Historia de aceleraciones, velocidades y desplazamientos de algunos terremotos utilizados.

Los resultados de las primeras investigaciones fueron incorporados al cuerpo normativo del UBC – 97 sin embargo, los diseños resultan extremadamente conservadores, aspectos muy criticados por muchos autores (Jangid, R. S. et al., 2001; Martelli, 2005).

Por otro lado la protección sísmica de estructuras aisladas sujetas a fuertes terremotos (presencia de pulsos largos de aceleración, velocidad y desplazamientos) no resulta ser una tarea simple (Gavin H., et al., 2002). Los mismos estudios citados anteriormente (Heaton T. H. et al., 1995) mostraron que los edificios con aislamiento de base sujetos a terremotos de falla cercana ($M_w = 7.0$), podrían producir, en el sistema de aislamiento, valores altos de distorsiones (los cuales excedían los 50 cm.) incluso para valores altos de amortiguamiento (25% del amortiguamiento crítico) y valores altos de desplazamientos en la interfase del dispositivo de aislamiento. Niveles altos de amortiguamiento reducen los desplazamientos del aislador en el modo fundamental pero se consiguen incrementos de aceleración en la misma. Por otro lado la contribución de los modos superiores puede incrementar los desplazamientos entre pisos (Gavin H., et al., 2002).

Investigaciones realizadas para evaluar la respuesta de estructuras aisladas frente a registros sísmico obtenidos para fallas cercanas (orientados en dirección paralela y normal a la falla) (Jangid, R. S. et al., 2001) determinaron que el valor máximo del desplazamiento de la estructura aislada está fuertemente influenciado por la componente normal y no por la paralela a la falla. El trabajo evalúa el comportamiento de distintos dispositivos y determina que un determinado tipo de aislador (conocido como el de la Compañía Eléctrica de Francia) conduce a una mejor respuesta frente a movimientos sísmicos asociados a campo cercano.

Otras investigaciones (Lee, T. Y. et al., 2004) indican la importancia de la adición de amortiguamiento en las estructuras de puentes para el control de los desplazamientos que imponen los movimientos asociados a falla cercana y la ubicación más conveniente de los mismos.

En función de los antecedentes citados se estima oportuno estudiar la influencia del amortiguamiento en dos parámetros de respuestas relevantes de todo sistema aislado. Para ello se varía el amortiguamiento del conjunto aislado dado por la ecuación (21) dentro de un rango admisible, es decir que se varía el área bajo el lazo fuerza – desplazamiento y por lo tanto la cantidad de energía disipada por los dispositivos de aislamiento. La variación de los valores numéricos de la ecuación (21) implica también una variación de la razón de amortiguamiento dada por la ecuación (24) para el modelo de dos grados de libertad (Figura 3 y 6).

En Figura 8 se presenta la variación de la aceleración en la superestructura en función del amortiguamiento para los terremotos presentados en la Tabla 3, mientras que en la Figura 9 se presenta la variación de los desplazamientos a nivel del sistema de aislamiento en función del amortiguamiento para los mismos terremotos.

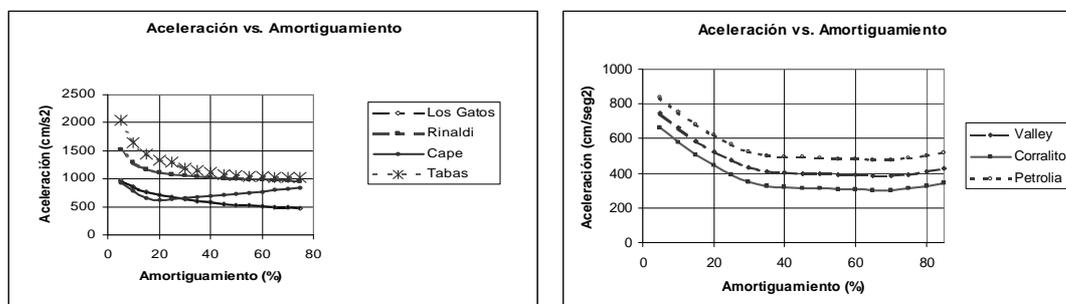


Figura 8: Variación de la aceleración en la superestructura en función del amortiguamiento de los dispositivos de aislamiento (primera parte).

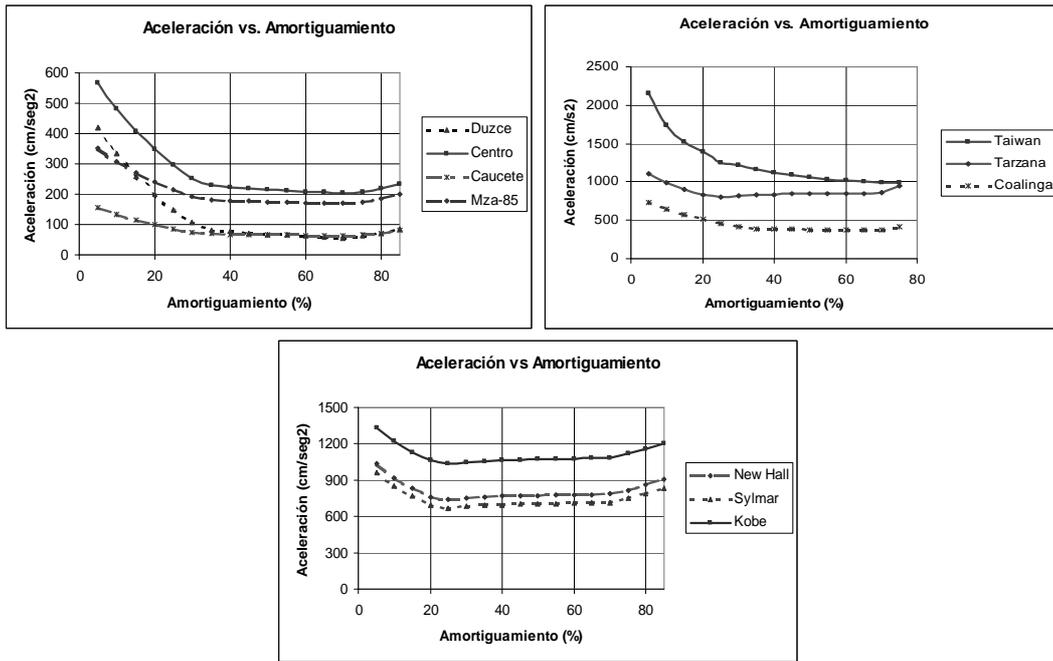


Figura 8: Variación de la aceleración en la superestructura en función del amortiguamiento de los dispositivos de aislamiento (segunda parte).

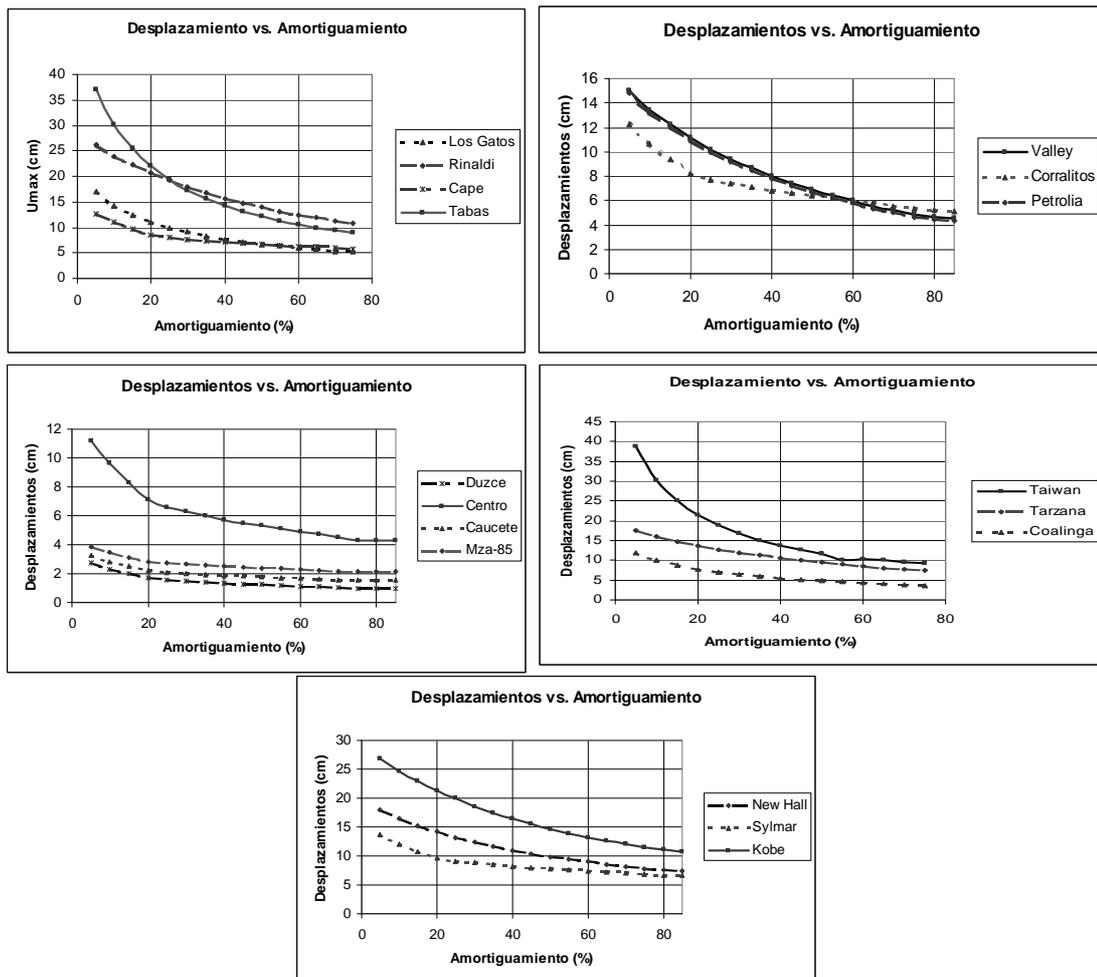


Figura 9: Variación del desplazamiento a nivel del sistema de aislamiento sísmico en función del amortiguamiento de los dispositivos de aislamiento.

Algunos resultados preliminares sobre el tema que presenta el trabajo, aún en instancia de procesamiento final, estarían indicando algunas diferencias en el concepto de amortiguamiento lineal equivalente para los movimientos del suelo con presencia de pulsos importantes de velocidad y desplazamientos. Con el objeto de exponer algunos de dichos resultados, se ha estudiado la respuesta del edificio con aislamiento sísmico admitiendo, ahora, sólo dos valores de amortiguamiento y los acelerogramas correspondientes al terremoto de Coalinga y Kobe. En la Figura 10 se representa la historia de desplazamientos y la relación corte en la base (por encima del sistema de aislamiento) versus desplazamiento al mismo nivel para un amortiguamiento del 15% para los dos terremotos citados. En la Figura 11 se representan los mismos parámetros pero para un amortiguamiento del 30%.

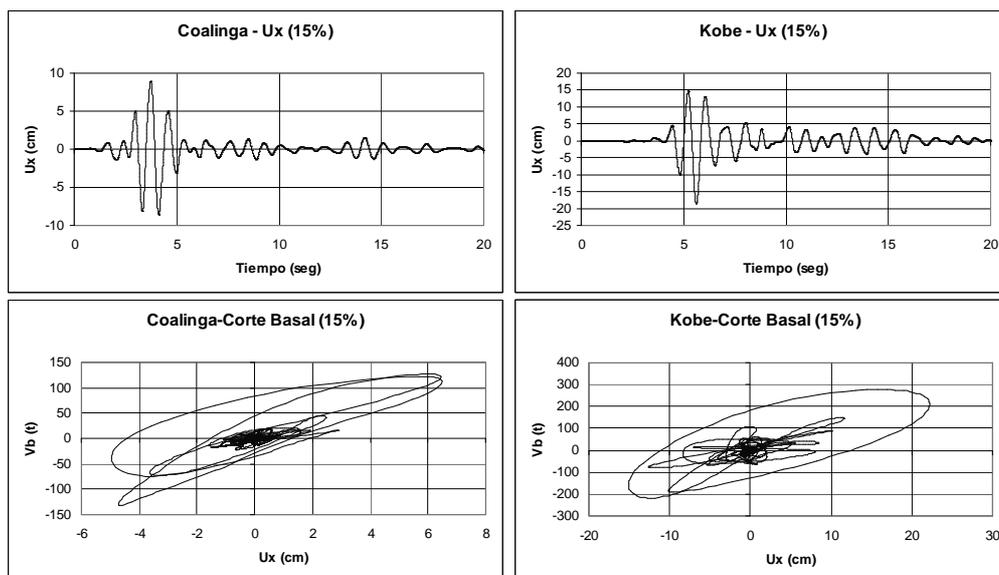


Figura 10: Historia de desplazamientos en la base del edificio con aislamiento y relaciones: corte en la base versus desplazamientos en la base para un amortiguamiento del 15% (Terremotos de Coalinga y Kobe).

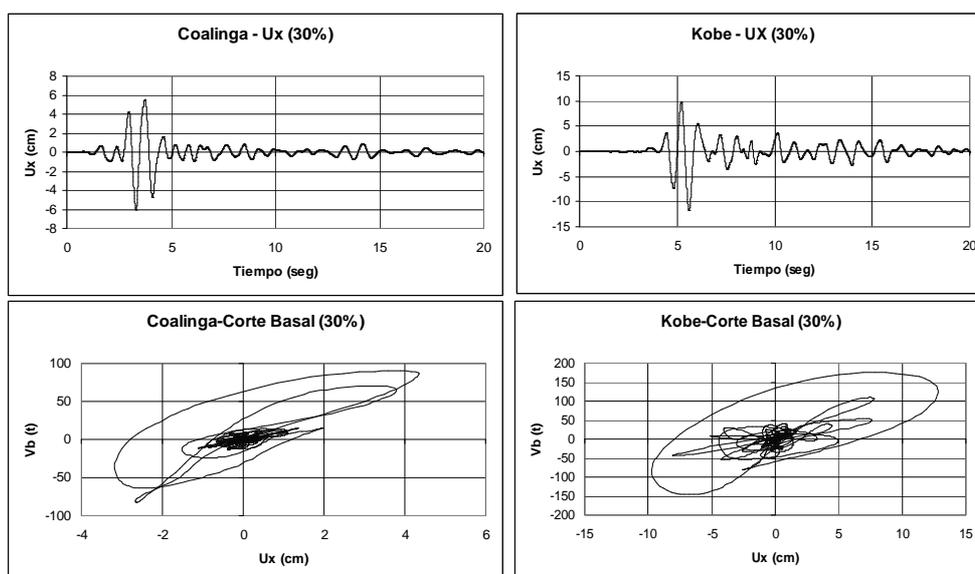


Figura 11: Historia de desplazamientos en la base del edificio con aislamiento y relaciones: corte en la base versus desplazamientos en la base para un amortiguamiento del 30% (Terremotos de Coalinga y Kobe).

En la Tabla 4 se sintetizan los valores de desplazamiento en la base del edificio aislado y

los cortes asociados a dicho desplazamientos en el mismo nivel.

Terremoto	Respuesta	Amortiguamiento	
		$\zeta_I = 15\%$	$\zeta_I = 30\%$
Coalinga	u_b (mm)	90	60
	V_b (KN)	1200	980
Kobe	u_b (mm)	180	120
	V_b (KN)	3000	1800

Tabla 4. Respuestas en términos de desplazamientos y cortes en la base del edificio con aislamiento sísmico para el terremoto de Coalinga y Kobe.

Los resultados indican que en la medida que aumenta el amortiguamiento se observan reducciones en los desplazamientos de aproximadamente un 30% y de un 20% y 40%, según el terremoto considerado, para los valores de corte en la base. El hecho de que el corte en la base se reduzca, para mayores valores de amortiguamiento, se debe a un aumento de las fuerzas de amortiguamiento lo que conduce a menores desplazamientos y menores fuerzas elásticas (Makris N. and Shih-Po C., 1998). Con relación al coeficiente de amortiguamiento efectivo se puede mencionar que ante la presencia de un pulso en la excitación del suelo, de duración menor a la del periodo natural de la estructura, evidencia vibraciones comprendidas dentro del periodo natural de la misma. Los gráficos de desplazamientos indicados en Figura 10 y 11 muestran ciclos dentro del rango de 1 seg. que es el periodo del edificio con aislamiento de base.

En función de dicha observación es posible admitir que, $\Omega = \omega_1$, y de acuerdo a la ecuación (19) el coeficiente de amortiguamiento efectivo debería ser $\beta_{eff} = \zeta_I = 15\%$ y $\beta_{eff} = \zeta_I = 30\%$ respectivamente para los dos casos presentados. Estudios realizados por Makris en 1998 sobre las respuestas de dos tipos de dispositivos de aislamiento sísmico bajo la ocurrencia de terremotos de falla cercana representados mediante un pulso equivalente, demostraron que si se trabaja con la ecuación (18) es posible evaluar el coeficiente de amortiguamiento efectivo midiendo directamente el área encerrada por el lazo de las relaciones corte versus desplazamientos indicadas en las Figuras 10 y 11, utilizando la expresión siguiente:

$$\beta_{eff} \cong \frac{\overline{W_D}}{2\pi} \frac{g}{\omega_1^2 D^2} \quad (25)$$

En la ecuación (25) el valor de $\overline{W_D}$, está en función de la energía disipada por ciclo definida en la ecuación (15), $\overline{W_D} = W_D / m * g$ y el desplazamiento puede estimarse como $D = ([u_{max}] + [u_{min}]) / 2$. Si se aplica entonces la expresión (25) se obtiene valores de $\beta_{eff} \approx 0.185$ para los gráficos de la Figura 10 y de $\beta_{eff} \approx 0.35$ para los lazos de la Figura 11. Las diferencias se deben a que los valores de ζ y de β_{eff} , dadas por las expresiones (16) y (18) respectivamente fueron definidos para vibraciones del tipo armónicas permanentes y no para respuestas del tipo transitorias como las indicadas en la parte superior de las Figuras (10) y (11).

6. CONCLUSIONES

Las relaciones entre aceleraciones y amortiguamiento de los dispositivos de aislamiento (Figura 8) indican, para algunos terremotos analizados, que en la medida que aumenta el amortiguamiento, la aceleración en la superestructura, primero decrece, luego pasa por un

valor mínimo y por último vuelve a crecer. En otros casos las aceleraciones muestran una tendencia a disminuir manteniéndose prácticamente constante a partir de un cierto valor de amortiguamiento respecto del crítico.

Las relaciones entre desplazamientos, a nivel de los dispositivos de aislamiento y su amortiguamiento, (Figura 9) indican que los desplazamientos decrecen en la medida que aumenta el amortiguamiento. Por lo tanto el valor del amortiguamiento a suministrarle a los dispositivos de protección se encuentra controlado por el valor de la aceleración que llega a la superestructura y no por el desplazamiento de los dispositivos de aislamiento porque, la aceleración presenta una tendencia a aumentar a partir de un valor comprendido entre el 20 y 25%.

Un mayor amortiguamiento puede considerarse una estrategia simple y relativamente económica para controlar los efectos de pulso que presentan los terremotos de campo cercano. Controla eficientemente los desplazamientos de los dispositivos de aislamiento sin un incremento importante del corte en la base y de la aceleración en la superestructura.

Algunos resultados preliminares, presentados en el trabajo, estarían indicando que el concepto de amortiguamiento lineal equivalente puede no ser general cuando el movimiento del suelo contiene importantes pulsos de desplazamientos y velocidad sin embargo, debido a los pocos datos producidos hasta la fecha, se plantea como conveniente profundizar el tema en futuras investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las autoridades de la Facultad Regional Mendoza de la UTN por el apoyo brindado durante el desarrollo del presente trabajo y a los docentes e investigadores del CEREDETEC por los aportes y sugerencias. Se agradece especialmente la colaboración de la empresa GERB Argentina por el apoyo brindado en las distintas etapas del proyecto del edificio con aislamiento sísmico de base.

REFERENCIAS

- Alavi B., Krawinkler H., Effects of Near-Field Ground Motion on Building Structures, *CUREE Publication N° CKIII-02. CUREE-Kajima Joint. Research Program, Phase II*, 2001.
- Al-Hussaini T., Zayas V., Constantinou M. Seismic Isolation of Multi-Story Frame Structures Using Spherical Sliding Isolation System. *Report NCEER-94-0007. National Center for Earthquake Engineering Research*. State University of New York. Buffalo, 1994.
- Anderson, J.C., Bertero V., Uncertainties in establishing design earthquake. *Journal of Structures and Engineering.*, ASCE, Vol. 113, pp 1709-1724, 1986.
- ATC-17-1, Vol. 1, 2 , Applied Technology Council. *Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control*, 1993.
- Baez J., Miranda E., Amplification factor to estimate inelastic displacement demands for the design of structures in the near field. *12th World Conference in Earthquake Engineering*. Paper 1561, New Zealand, Society for Earthquake Engineering, 2000.
- Balachandran B., Magrab B., E., *Vibraciones*. Editorial Thompson. México. 2005.
- Bertero V. Establishment of design Earthquake: evaluation of present methods. *Proceeding International Symposium on Earthquake Structural Engineering*. Vol. 1, St Louis, University of Missouri-Rolla, 551-580, 1976.
- Campillo M., Gariel J. C., Aki K., Sanchez Sesma F. J., Destructive strong ground motion in México City: Source, path and site effects during great 1985 Michoagan earthquake. *Bulletin Seismological Soc. Of America*, Vol. 79, N° 6, pp. 1718-1735, 1989.
- Chopra, A. K. *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*.

- Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- Clough, R. W., Penzien J. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill. New York, 1993.
- Constantinou M., Mokha A., Reinhorn A. Teflón Bearing in Base Isolation, Part II: Modeling. *Journal of Structural Engineering*. ASCE 116, 455-474, 1990.
- CSI, 2000. Computer and Structures, Inc. SAP2000, *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*, V.9, Berkeley, California, 2003.
- De la Llera M. J., Inaudi B. J. A., Lüder S. C., Análisis y Diseño de sistemas de aislación sísmica y disipación de energía. SIRVE 98. *Pontificia Universidad Católica de Chile*. Santiago de Chile, 1998.
- Frau C. D., Saragoni G. R., Demanda sísmica de fuente cercana. Situación del Oeste Argentino. *Congreso Chileno de sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas*. Concepción, Chile, CD. A01-18.
- Gavin H., Alhan C., Inter-story Drift Amplification and Damping in Passive Isolation Systems. *00212 Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE)* Earthquake Engineering Research Institute (EERI). Boston, Massachusetts, 2002.
- Hall J. F., Heaton T. H., Halling M. W., Wald D. J. Near Source ground motions and its effects on flexible building. *Earthquake Spectra*. Vol. 11, pp. 569-605, 1995.
- Heaton T. H., Hall J. F., Wald D. J., Halling M. W., Response of high-rise and base-isolated building in hypothetical Mw 7.0 blind trust earthquake. *Science* 1995, 267:206-211, 1995.
- ICBO UBC SC 1997. Uniform Building Code. *International Conference of Building Officials*, 1997.
- Iwan W. D., Chen X. D. Important near-field ground motion data from the Lander earthquake. *Proceeding 10th European Conference Earthquake Engineering*, 1994.
- Iwan W. D., Evaluation of the effects of near-source ground motion [on line]. *PG & E PEER. Directed Studies Program, Berkeley* [Available in <http://peer.berkeley.edu/news/1998may/nsource.html>], 1998.
- Jangid R. S., Kelly J. M. Base Isolation for near-fault motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 30:691-707, 2001.
- Kelly J. M., *Earthquake Resistant Design with Rubber*, Springer-Verlag, London, 1997.
- Kramer, S. L., *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- Lee, T. Y., Kawashima K., Effectiveness of Supplementary Dampers for Isolated Bridges under strong near-field ground motions. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver. B. C., Paper N° 138. Canadá., 2004.
- Madden G., Wongprasert N., Symans M., Analytical study of an Adaptive Sliding Base Isolation System for Seismic Protection of Building. *Computer Aided Civil and Infrastructures Engineering*. Vol. 18. Issue 1. pp 19. Edition 2003, 2001.
- Makris E. E., Morrison A. J., Plummer C.S, Effect of Damping on the response of seismically Isolated Structures. *Pacific Earthquake Research Center. PEER 1998/06*, 1998.
- Martelli A., Modern Seismic Protection Systems for Civil and Industrial Structures. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas*. Concepción. Chile. CD. ISSN 0718-2678, 2005.
- Saragoni G. R., Características destructivas de los acelerogramas de fuente cercana y los grandes terremotos argentinos. *XVIII Jornadas de Ingeniería Estructural* CD. Conferencia 4. Buenos Aires Argentina, 2004.
- Sasani M., Bertero V., Importance of severe pulse-type ground motions in performance based engineering: historical and critical review. *12th Conference on Earthquake on Engineering*, New Zealand, paper 1302, 2000.
- Somerville P. G., Smith N., Accounting for near-fault rupture directivity in the development of design ground motions. *11th World Conference on Earthquake on Engineering*. Acapulco. Mexico. Paper 711. ISBN 088-042822-3, 1996.

- Stuardi J., Massa J., Brewer A., Eficiencia de sistemas de aislamiento sísmico basados en resortes helicoidales y amortiguadores viscosos comparada con aisladores tradicionales de goma-metal. *VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional*. CD. Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas y Centro de estudios avanzados Universidad Argentina de la Empresa, 2005.
- Tornello M. E., Sarrazin A. M., Desarrollo e implementación de un sistema de aislación sísmica de base para el edificio de la residencia universitaria de la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*. Edit. Barbat A., Aguiar Falconi R., Escuela Politécnica del Ejército. Ecuador. Vol. 9 N° 1. pp. 71-91. ISSN 1390-0315, 2004.
- Tornello M. E., Sarrazin A. M., Respuesta estructural de dos sistemas de aislamiento sísmico frente a terremotos de fuente cercana. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas*. Paper A13-04. CD. SIN 07118-2678, 2005.
- Tornello M. E., Sarrazin A. M., Protección de estructuras mediante aislamiento sísmico ubicadas en zonas cercanas a la falla. *XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*. CD. Mar del Plata. Argentina, 2006.
- Tornello, M. E., Sarrazin A. M., Dynamic response of building with base isolation for near-fault motion. *9th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Paper 1057 CD (CAEE, ACEP)*. Ottawa. Canadá, 2007.
- Tornello M. E., Sarrazin A. M., Protección de estructuras mediante el uso de sistemas de aislamiento sísmico. Respuesta estructural frente a terremotos de falla cercana. VII Encuentro de Investigadores y profesionales argentinos de la construcción (VII EIPAC 2007). Salta. Argentina. CD. Paper E-05, ISBN 978-987-9381-84-7, 2007.
- Wilson Edward L. *Three dimensional static and dynamic analysis of structures. A Physical approach with emphasis on Earthquake Engineering*. CSI. Computer & Structures Inc. SAP 90, SAP2000, SAFE, FLOOR and ETABS. 2001.