

## MODELO PROPUESTO PARA EL ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON AISLADORES DE BASE TIPO RESORTE

Roberto Aguiar F.<sup>a</sup>, Miguel E. Tornello<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. Av. El Progreso s/n. Valle de los Chillos, Ecuador, [ragiar@espe.edu.ec](mailto:ragiar@espe.edu.ec), <http://www.espe.edu.ec>

<sup>b</sup>Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica. CeReDeTec. Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional. Rodríguez 273 (5500) Mendoza, Argentina, [mtornell@frm.utn.edu.ar](mailto:mtornell@frm.utn.edu.ar), <http://www.frm.utn.edu.ar>

**Palabras claves:** Protección sísmica. Aislamiento sísmico. Disipación de energía. Respuesta estructural. Terremotos. Falla cercana.

**Resumen.** Los terremotos destructivos son uno de los fenómenos naturales que causan, anualmente, la mayor cantidad de pérdidas económicas y de vidas humanas. En las últimas dos décadas la ingeniería estructural sismorresistente ha desarrollado nuevas estrategias para proteger las construcciones de terremotos destructivos entre las que se destacan los sistemas de aislamiento sísmico. El objetivo del trabajo es evaluar la respuesta en el tiempo, en términos de desplazamientos, de un edificio con aislamiento sísmico de base a través de un algoritmo numérico compacto. Para ello se propone un modelo matemático para el análisis sísmico de estructuras con aisladores de base compuestos por resortes helicoidales de acero instalados junto a amortiguadores visco elásticos. Se plantea como hipótesis que la presencia de dispositivos de baja rigidez lateral entre la superestructura y la fundación permite desacoplar las respuestas del edificio aislado de los movimientos del suelo provocados por los terremotos. Se obtienen respuestas en el tiempo, cuando actúan las tres componentes de terremotos con características de falla cercana. En el modelo que se propone se consideran tres grados de libertad para cada dispositivo de control del sistema de aislamiento que corresponden a los desplazamientos en las tres direcciones. Para la superestructura se admite que todo el piso tiene el mismo desplazamiento horizontal y que cada nudo posee un desplazamiento vertical. Las masas del sistema de aislamiento se concentran en los aisladores y las de la superestructura en cada nudo. Se encuentran la respuesta en el tiempo de un edificio de tres pisos construido en la ciudad de Mendoza, con los dispositivos de control mencionados. Los resultados obtenidos con el método numérico propuesto se comparan con los que reporta el SAP2000. Los valores encontrados con la metodología propuesta en el trabajo son comparables con los obtenidos por otros softwares de uso comercial y de amplia difusión.

## 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, en muchos proyectos de ingeniería, se utilizan técnicas modernas para controlar los efectos de los terremotos, entre ellas se destacan los sistemas pasivos de control de vibraciones y también de aislamiento sísmico. Ambas constituyen herramientas eficientes para garantizar la seguridad de las construcciones frente a la ocurrencia de los terremotos. La protección no sólo se limita a los elementos estructurales, sino también a los no estructurales y fundamentalmente a los contenidos, en muchos casos de mayor valor económico que la construcción misma (Martelli, 2005).

La implementación de los sistemas de aislamiento sísmico permite reducir la demanda sísmica sobre las estructuras y asegurar su capacidad de resistencia frente a terremotos destructivos, por lo tanto dichas estructuras muestran un comportamiento elástico ante la ocurrencia de importantes terremotos.

Las primeras investigaciones sobre un edificio realmente construido sobre un sistema de aislamiento sísmico se atribuyen a John Milne quien fue profesor de la carrera de ingeniería en minería en Tokio entre 1876 y 1895. La estructura fue construida sobre bolas de acero contenidas en cajas, también de acero. Por encima de las mismas existía una placa de acero tomada al edificio cuya superficie de contacto con las bolas tenía forma cóncava, otra placa de idénticas características se ubicaba por debajo de las bolas. El edificio fue instrumentado y aparentemente ensayado a movimientos sísmicos, las experiencias obtenidas fueron publicadas en 1885 en el informe de la Asociación Británica para el avance de la ciencia. El primer informe contemplaba un diámetro de bolas de 10 pulgadas, al año siguiente, en 1886, el trabajo fue actualizado y se publicaron los resultados para diámetros de bolas de 8, 1 y  $\frac{1}{4}$  de pulgadas (Naeim y Kelly, 1999).

Las aplicaciones prácticas concretas de los sistemas de aislamientos sísmicos comienzan a desarrollarse hace aproximadamente 25 años con el impulso de los aisladores elastoméricos. Los mismos son fabricados con láminas de goma vulcanizadas a planchas de acero, tienen una importante rigidez vertical lo que le permite soportar y transferir eficientemente las cargas verticales del edificio. Son muy flexibles lateralmente precisamente, en la dirección más exigida ante la ocurrencia de terremotos. Desarrollos posteriores de los dispositivos de protección han permitido la fabricación de aisladores para otras aplicaciones como son los puentes y para el control de vibraciones. En los últimos años se han ideado nuevos sistemas de aislamiento (friccionales, aisladores de goma con núcleo de plomo, goma de alto amortiguamiento, resortes, etc.). Todos ellos persiguen el mismo objetivo, desacoplar al edificio de los efectos destructivos de los terremotos.

El concepto de aislamiento sísmico es ampliamente aceptado en regiones sísmicas para proteger edificios importantes o que deban cumplir funciones esenciales después de ocurrido el terremoto, de hecho hay muchos ejemplos en Estados Unidos de Norteamérica, Japón, Italia y Nueva Zelanda, sin embargo también existen proyectos de menor costo para viviendas económicas de los cuales hay casos realmente construidos en Chile, China y Armenia.

Otros de los beneficios importantes de los dispositivos de aislamiento es la protección de los contenidos de edificios esenciales. El caso de hospitales, por ejemplo, el equipamiento tiene un costo muchas veces mayor que el propio edificio. Suministrar una mayor resistencia al edificio, en muchos casos, no garantiza valores aceptables de distorsiones de piso o de aceleraciones en altura. Cantidades elevadas de distorsiones de piso causan daños en los componentes no estructurales y en sus contenidos. Aumentar la rigidez del edificio permitiría disminuir la distorsión de piso, sin embargo ello no garantiza una reducción de las aceleraciones, por otro lado reducir la rigidez del mismo permitiría reducir las aceleraciones pero no las distorsiones de piso. Los sistemas de aislamiento sísmico permiten controlar

simultáneamente los dos parámetros debido a que cuentan con la flexibilidad necesaria como para concentrar toda la deformación a nivel de los dispositivos (Bozzo y Barbat, 2000).

El aislamiento sísmico permite desacoplar la estructura de la componente horizontal del terremoto gracias a su baja rigidez en dicha dirección, esa propiedad le proporciona a la estructura una frecuencia natural que es mucho menor que aquella que tendría si el edificio fuese de base fija o tuviese la frecuencia predominante del terremoto (Kelly, 1993). En general los sistemas de aislamiento más utilizados a nivel mundial, elastoméricos o friccionales, poseen una importante rigidez vertical lo que no permite desacoplar eficientemente al edificio de la componente del movimiento del suelo en esa dirección.

Movimientos del suelo con características de falla cercana (presencia de pulsos importantes de velocidad y desplazamiento) presentan, en muchos casos, valores de aceleraciones verticales importantes comparados con las horizontales, por lo tanto, en general, los dispositivos de aislamiento con rigideces verticales elevadas comparadas con las horizontales no son efectivos para desacoplar a la superestructura de la componente vertical del terremoto.

Un análisis dinámico modal indica que, en el primer modo, la deformación se concentra a nivel de los dispositivos de aislamiento sísmico, mientras que el edificio, emplazado por encima del mismo, se comporta como un cuerpo rígido. Los modos superiores que provocan deformaciones en la superestructura son ortogonales al primer modo y por lo tanto lo son a dicha componente del terremoto. Dichos modos superiores no participan en el movimiento, por lo tanto, las altas energías y distintas frecuencias del terremoto no pueden ser transmitidas a la superestructura (Naeim y Kelly, 1999).

La influencia del amortiguamiento en la respuesta de sistemas con aislamiento sísmico ha sido evaluadas por distintos autores (Naeim y Kelly, 1999; Jangid y Kelly, 2001; Tornello y Sarrazin, 2008). Estudios teóricos del acoplamiento de las ecuaciones dinámicas para sistemas de aislamiento sísmico (Naeim y Kelly, 1999), expresan conclusiones sobre la influencia del amortiguamiento en los valores de las aceleraciones de piso. En la práctica y para los casos frecuentes se asume que los términos ubicados fuera de la diagonal principal de la matriz de coeficientes de amortiguamiento son despreciables, lo que permite resolver el sistema de ecuaciones del movimiento como un sistema desacoplado, bajo esta condición y con procedimientos simples es posible obtener, de manera rápida, la respuesta de la estructura con aislamiento sísmico (desplazamientos, cortes en la base, distorsión de piso, etc.).

Sin embargo para determinados terremotos, sobre todo para los asociados a campo cercano, o para requerimientos de códigos actuales (ICBO-UBC, 1997), se hace necesario controlar los valores importantes de desplazamientos que le imponen tales requerimientos. Dichos desplazamientos pueden ser limitados mediante la adición de amortiguamiento al sistema de aislamiento sísmico. Los aisladores más comúnmente utilizados (elastoméricos o friccionales) son capaces de proveer valores de amortiguamiento limitados (del orden del 10-15%) y los mismos no son viscosos. Para valores más importantes de amortiguamiento, las ecuaciones no pueden desacoplarse por lo que es necesario utilizar análisis más complejo, algunos de ellos ya desarrollados (Kelly, 1996).

Los trabajos realizados sobre el acoplamiento de las ecuaciones de movimiento realizados por Naeim en 1999, determinaron la variación de la aceleración de piso en función del factor de amortiguamiento. El trabajo determina la aceleración máxima en la superestructura como suma de dos términos, y su valor máximo se obtiene para un amortiguamiento del 26%, mientras que el mínimo se logra para un 12%. Por lo tanto si uno aumenta el amortiguamiento se logra reducir el desplazamiento del sistema de aislamiento a expensas de mayores valores de aceleración y distorsiones de piso.

Si bien el autor destaca y concluye que el aumento de amortiguamiento puede ser

perjudicial comparado con otros dispositivos con menor amortiguamiento, se considera que la conclusión ofrece una respuesta parcial al problema sobre todo porque no contempla dos factores, el primero dar una solución a los efectos que provoca la presencia de pulsos largos en los terremotos de falla cercana y la segunda los requerimientos de grandes dimensiones exigidas a los aisladores para controlar los desplazamientos que imponen dichos pulsos; todo ello sin enumerar el espacio físico que debe disponerse para garantizar el libre movimiento de la estructura aislada.

Actualmente en Argentina existe un solo edificio aislado sísmicamente. El mismo se encuentra emplazado en la Provincia de Mendoza y constituye unos de los edificios de la residencia de estudiantes de la Facultad Regional Mendoza de la UTN. El diseño, análisis y resultados de sus respuestas han sido presentados en números congresos de la especialidad (Tornello y Sarrazin, 2004; 2005; M. Tornello y Sarrazin, 2007). Con el objeto de avanzar con el plan de investigación propuesto, en este trabajo se presenta un modelo numérico de análisis que permite obtener las respuestas en términos de desplazamientos horizontales y verticales y además las aceleraciones que ingresan a la superestructura de manera simple, con un considerable ahorro de tiempos computacionales en la carga de datos. La metodología que se propone permite obtener la historia de las respuestas en el dominio del tiempo. Los resultados obtenidos con el modelo que propone el trabajo se comparan con los que arroja el SAP2000 cuando se utiliza un modelo espacial en elementos finitos (Tornello y Sarrazin 2007).

## 2 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO CON AISLAMIENTO SÍSMICO

El edificio forma parte del complejo de la Residencia de estudiantes de la Facultad Regional Mendoza. Está compuesto por tres torres de tres niveles destinado a dormitorios, más el cuerpo de administración y servicio el cual alberga la zona de recepción, estar, comedor, cocina, sanitarios, salas de lectura y aulas de usos múltiples. Los tres edificios destinados a dormitorios poseen las mismas características arquitectónicas y estructurales, constan de tres niveles y planta rectangular de (8.20 x 7.60) m. El sistema de aislamiento sísmico ha sido implementado en el edificio designado como Torre 3 (Figura 1). La superficie de cada torre destinada a dormitorios es de 176 m<sup>2</sup>, lo que hace un total de 528 m<sup>2</sup> entre los tres edificios. El cuerpo de administración y servicio, se desarrolla en dos niveles con una superficie total del cuerpo de 394 m<sup>2</sup>, que sumada a la anterior hace un total de 922 m<sup>2</sup>. En Figura 1 se observa una planimetría general del complejo a nivel de la planta baja, en Figura 2 se indica una planta tipo de arquitectura y en Figura 3 un esquema estructural de la planta tipo.

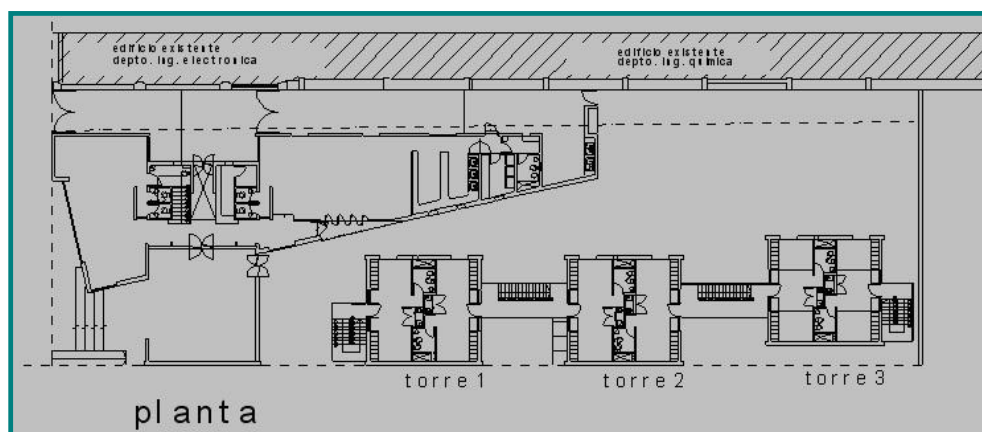


Figura 1. Planimetría general del complejo a nivel de Planta Baja.

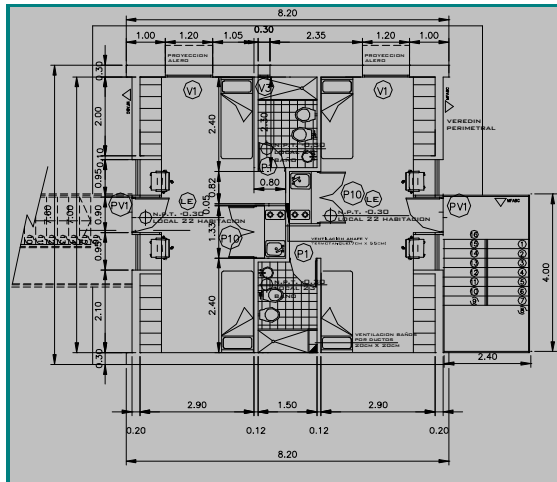


Figura 2. Planta de arquitectura tipo del edificio de dormitorios.

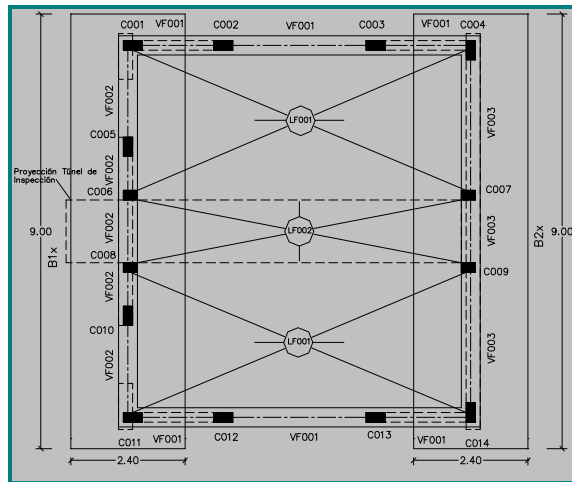


Figura 3. Planta de estructura tipo del edificio de dormitorios.

Los muros exteriores son de mampostería (ladrillo macizo cocido), con espesores de 20 y 30 cm. Los entrepisos y cubierta de techo están conformados por una losa plana. Las divisiones interiores han sido realizadas con placas de roca de yeso. La totalidad de los edificios que conforman el complejo de la residencia de estudiantes y en particular las torres destinadas a dormitorios, pertenecen a la categoría de construcciones de hormigón armado. Las fundaciones han sido resueltas con base corridas y vigas rígidas de fundación incorporadas a dichas bases de hormigón armado. La cota de fundación de las base corridas se emplazan a (-200; -250 cm). En la Figura 4 se observa un esquema general de la ubicación de los dispositivos de aislamiento debajo del edificio.

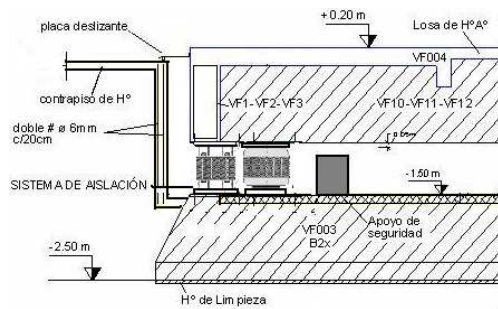


Figura 4. Dispositivos del sistema de aislamiento posicionado debajo del edificio.

Las masas del edificio de base fija y con aislamiento sísmico se indican en Tabla 1. Los valores de tabla incluyen una participación del 25% de las cargas accidentales.

Nivel	Edificio con base fija (KN. s <sup>2</sup> /m)	Edificio con aislamiento sísmico (KN. s <sup>2</sup> /m)
1	69.06	158.77
2	56.33	56.33
3	46.96	46.96
Total	172.35	262.06

Tabla 1: Masas del edificio aislado y con base fija

Con relación a las masas del edificio aislado se aclara que, en la masa del primer nivel se ha incluido la correspondiente al nivel considerado ( $69.06 \text{ KN} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ ) más la asociada a la losa y vigas por encima del sistema de aislamiento ( $89.71 \text{ KN} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ ). Las masas asociadas a los dispositivos de aislamiento son tomadas en cuenta directamente por el programa que representa al modelo propuesto en el presente trabajo. La masa total de los dispositivos de aislamiento es de  $8.15 \text{ KN} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ .

En la Figura 5 se muestra el modelo de elementos finitos del SAP2000 utilizado para comparar las respuestas en términos de desplazamientos y aceleraciones, con el método de análisis que presenta el trabajo. Mayor información sobre las respuestas del edificio aislado, si se utiliza como herramienta de análisis el SAP2000, puede consultarse en Tornello y Sarrazin, 2007.

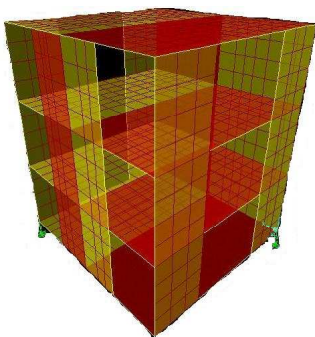


Figura 5. Modelo de elementos finitos del edificio aislado utilizado para evaluar las respuestas dinámicas en SAP2000

### 3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO

Los dispositivos de aislamiento basados en resortes helicoidales de acero, hasta la fecha, han sido utilizados casi exclusivamente para aislar equipos industriales y otros de sus propias vibraciones para proteger sistemas próximos. Otras aplicaciones han estado dirigidas al aislamiento de construcciones para filtrar las vibraciones del tránsito vehicular o de trenes.

Originalmente comenzó a aplicarse en máquinas de pequeño porte, luego se extendió a fundaciones de máquinas pesadas e instalaciones industriales de importancia, por ejemplo, una platea de fundación de turbogeneradores (Stuardi et al, 2005).

Sin embargo en los últimos años se han realizado estudios sobre la respuesta de estructuras aisladas utilizando dichos dispositivos para otras construcciones y cuando ellas se encuentran sujetas a la acción de terremotos destructivos (Nawrotzki, 2001, Stuardi, 2003, Stuardi et al, 2005, Tornello y Sarrazin, 2005)

Los resortes poseen la ventaja de tener un comportamiento conocido y controlado, son adecuados a las altas temperaturas, no presentan fluencia ni tampoco desplazamientos residuales. Comparativamente con otros dispositivos son de menor costo, presentan la desventaja de que el sólo resorte posee bajo amortiguamiento (cerca del 2%) por lo tanto es necesario instalarlos con otros dispositivos que permitan aumentar dicho valor. Para soportar elevadas cargas deben utilizarse paquetes de resortes debido a que la capacidad de carga de un único resorte, relacionado con las dimensiones y diámetro del espiral, tecnológicamente es de difícil fabricación.

Los aisladores elastoméricos y friccionales, en sus distintos modelos, son efectivos para filtrar el movimiento horizontal del suelo. Los sistemas basados en resortes metálicos han sido



utilizados en viviendas para proveer aislamiento en las tres direcciones (Naeim y Kelly, 1999). Los sistemas de resortes para aislamiento sísmico (GERB Control System ®) fueron, originalmente diseñados, para controlar las vibraciones que generaban las turbinas en plantas hidroeléctricas. El aislador está conformado por paquetes de resortes con baja rigidez en sentido horizontal y vertical, sin embargo para aumentar el amortiguamiento del sistema de aislamiento se instalan junto con amortiguadores visco elásticos (Visco®), (Figura 6-a y 6-b).

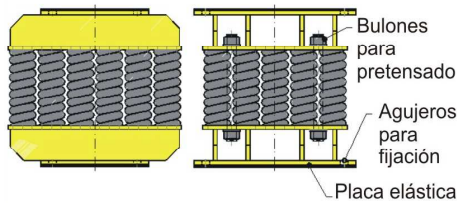


Figura 6-a: Paquete de resortes metálicos GERB ®

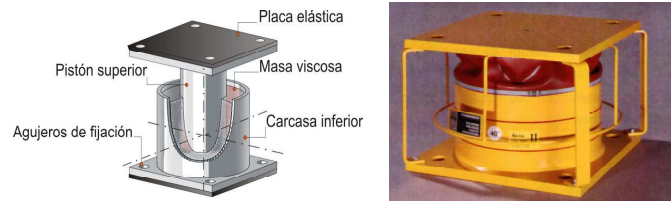


Figura 6-b: Amortiguadores visco elásticos GERB (Visco®)

Investigaciones orientadas a evaluar la respuesta para distintas configuraciones estructurales (simétricas y asimétricas) con distintos tipos de aisladores sísmicos y frente a movimientos de falla cercana (Wolf et al, 2004) indican que si se aumenta ligeramente el valor del amortiguamiento en los aisladores elastoméricos, se observa una reducción de desplazamientos, distorsiones de piso, fuerzas cortantes, aceleraciones y velocidades.

El uso de amortiguadores viscosos no lineales conduce a mayores distorsiones de piso y fuerzas de corte que los dispositivos con amortiguamientos viscosos lineales. Los resultados experimentales demostraron que una elevada no linealidad del sistema de aislamiento, por ejemplo aisladores elastoméricos combinados con friccionales, no tiene un alto impacto sobre los contenidos de la estructura aislada, aspecto confirmado por otras investigaciones (Skinner et al, 1993). La respuesta de los contenidos de la estructura aislada depende del rango de frecuencia en relación con la frecuencia fundamental de la estructura aislada y del tipo de sistema de aislamiento sísmico utilizado.

Basado en los antecedentes sobre la influencia del amortiguamiento en la respuesta de estructuras con aislamiento sísmico (Tornello y Sarrazin, 2008) el sistema de aislamiento, compuesto por los aisladores de resortes de acero y amortiguadores visco elásticos, fue diseñado con una rigidez lineal, tanto horizontal como vertical y un amortiguamiento que se aproxima al lineal viscoso de acuerdo a lo indicado en la Figura 7.

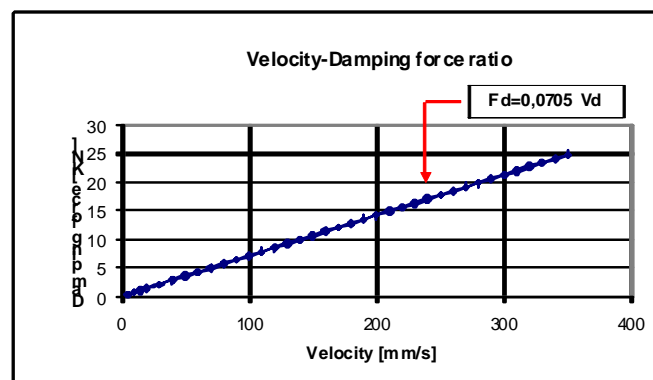


Figura 7. Relación lineal entre la fuerza máxima de amortiguamiento y el valor máximo de la velocidad.

La cantidad de resortes que componen el paquete es función de la rigidez vertical, horizontal y de las capacidades a cargas estáticas y dinámicas impuestas por las acciones en servicio y sísmicas. Atendiendo al caso tratado en el presente trabajo y como consecuencia de una mayor carga vertical en uno de los lados del edificio, dos de los paquetes están compuestos por 30 resortes, con una capacidad de carga vertical de 921 KN y los otros dos por 28, con una capacidad de carga vertical de 768 KN. En Tabla 2 se resumen las características principales del sistema de aislamiento.

Parámetro	Notación	28 Resortes	30 Resortes	Unidad
Capacidad nominal a carga vertical	$F_v$	768	921	KN
Rigidez vertical	$K_v$	29500	35400	KN/m
Rigidez horizontal	$K_h$	3940	4730	KN/m
Amortiguamiento horizontal	$c_h$	26	26	%
Amortiguamiento vertical	$c_v$	13	13	%
Diámetro exterior del resorte	$D$	105	105	mm.
Diámetro espira resorte	$d$	26	26	mm.
Altura libre del resorte	$h_s$	271	272	mm.

Tabla 2: Parámetros principales del sistema de aislamiento.

Las rigideces laterales y verticales de los resortes son funciones del módulo de corte del material del resorte; diámetro de la espira que conforma el resorte; número de espiras activas; diámetro exterior del resorte y altura libre del resorte. (Tornello y Sarrazin, 2007). La rigidez lateral de los resortes, sujetos a acciones dinámicas se encuentra influenciada por un efecto combinado de flexión y torsión.

#### 4 MODELO DE ANÁLISIS PROPUESTO

Como hipótesis se plantea que la losa es rígida en el plano horizontal razón por la cual se admite un grado de libertad vertical en cada uno de los nudos de la superestructura. Por otra parte, se considera que todo el piso experimenta el mismo desplazamiento horizontal. En la Figura 8 se indican los grados de libertad considerados; nótese que primero se han enumerado los desplazamientos horizontales de piso y posteriormente los desplazamientos verticales.

La estructura analizada e indicada en la Figura 8 tiene 27 grados de libertad o 27 desplazamientos, 3 en sentido horizontal (sentido X) y 24 en sentido vertical. Estos desplazamientos se agrupan en un vector  $\mathbf{u}$ . Este modelo es útil para el análisis sísmico de la estructura ante la acción de dos componentes sísmicas, una horizontal en la dirección de los desplazamientos horizontales y otra vertical. Se define al vector transpuesto  $\mathbf{u}^t = [\mathbf{u}_x \quad \mathbf{u}_z]$  donde  $\mathbf{u}_x$  es el vector que contiene a los desplazamientos de piso en sentido horizontal;  $\mathbf{u}_z$  el vector que contiene a los desplazamientos de cada nudo en sentido vertical.



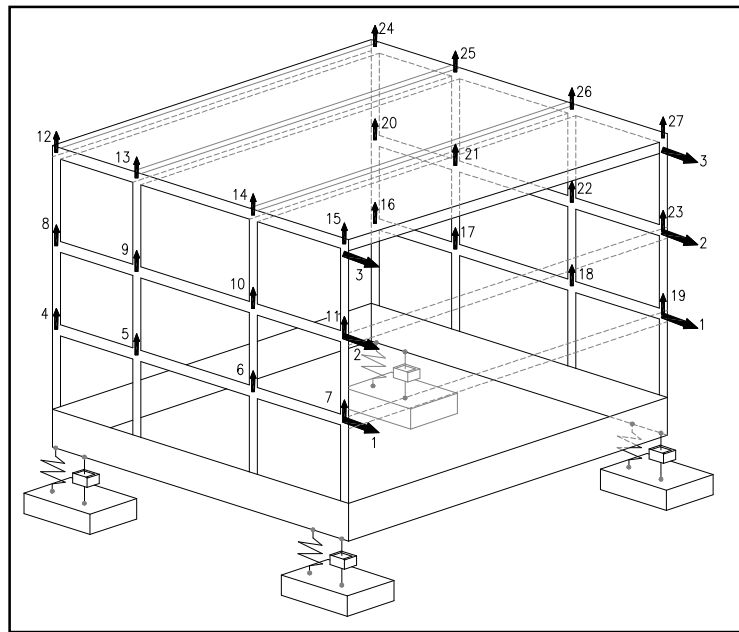


Figura 8. Grados de libertad considerados para la superestructura

En el sistema de aislamiento se han considerado tres grados de libertad en cada dispositivo de control, Figura 9. Primero se han numerado los desplazamientos en sentido X, luego en sentido Y y finalmente los desplazamientos verticales. Dado que la estructura tiene 4 dispositivos de aislamiento, se tendrán 12 grados de libertad que se los agrupa en un vector  $\mathbf{q}$ . El vector transpuesto se define como  $\mathbf{q}^t = [\mathbf{q}_x \quad \mathbf{q}_y \quad \mathbf{q}_z]$ . Donde  $\mathbf{q}_x$  es un vector compuesto por los desplazamientos en sentido X,  $\mathbf{q}_y, \mathbf{q}_z$  vectores conformados por los desplazamientos del sistema de aislamiento en sentido Y, y Z.

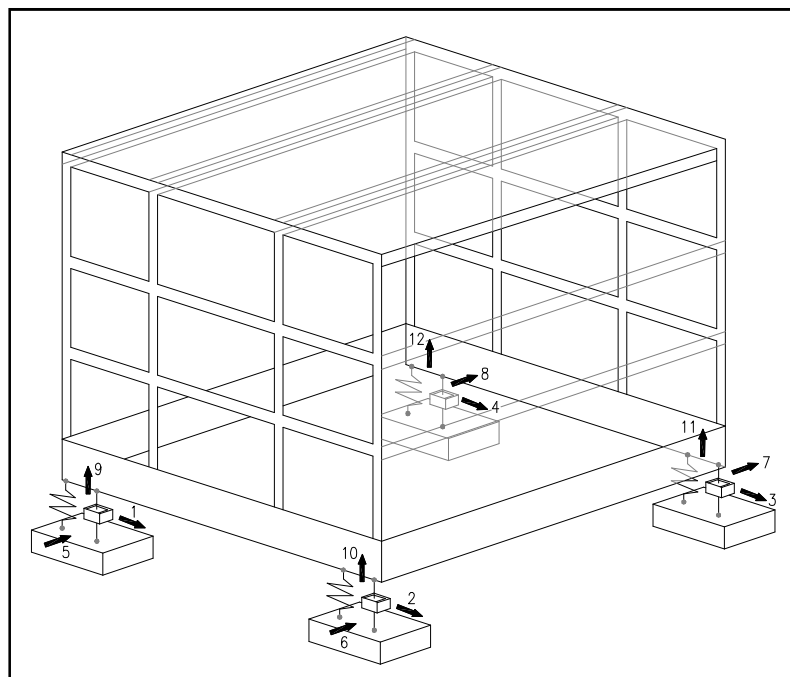


Figura 9. Grados de libertad del sistema de aislamiento

Las masas del edificio se han discretizado en cada uno de los nudos de la superestructura, Figura 10. La numeración de las masas está en concordancia con la numeración de los grados de libertad mostrados en la Figura 8. Primero se enumeran las masas de todo un plano vertical desde el primer piso hasta el último piso y luego la numeración continúa en el siguiente elemento.

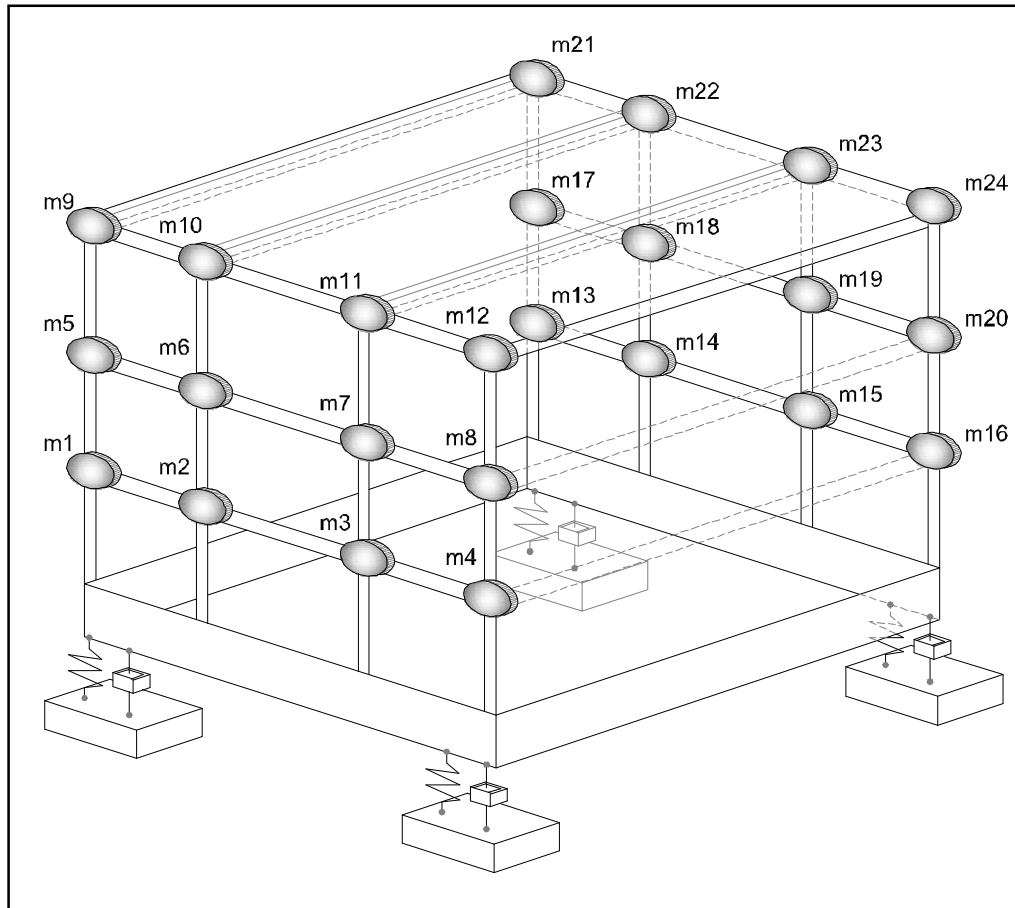


Figura 10. Discretización de las masas del edificio

En la Figura 11 se aprecia la discretización de las masas del sistema de aislamiento. Cada una de estas masas se obtiene tomando en cuenta el peso de los propios dispositivos de control y de la losa y vigas ubicadas por encima de los dispositivos de aislamiento.

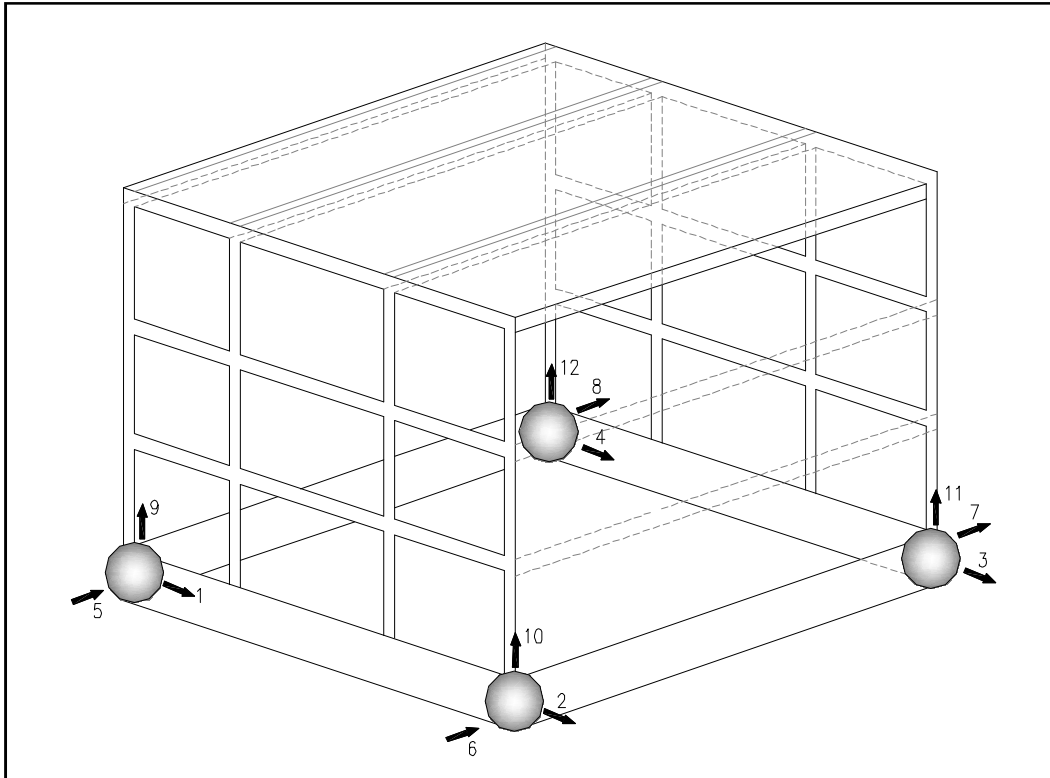


Figura 11. Discretización de las masas del sistema de aislamiento

#### 4.1 Matrices de la superestructura

La matriz de rigidez  $\mathbf{K}^{(s)}$  de la superestructura se obtiene a partir de la matriz de rigidez lateral-vertical,  $\mathbf{K}_{L-V}$  de cada uno de los planos verticales. En cada plano se considera que las vigas son axialmente rígidas de tal manera de tener un único desplazamiento horizontal por piso y que las columnas son totalmente flexibles. En consecuencia se tiene un desplazamiento horizontal por piso y dos grados de libertad en cada nudo, el desplazamiento vertical y la rotación. Se encuentra la matriz de rigidez completa del pórtico con los grados de libertad indicados y luego se condensa para tener solo desplazamientos horizontales de piso y desplazamientos verticales en cada nudo. A esta matriz se la denomina matriz de rigidez lateral-vertical  $\mathbf{K}_{L-V}$  (Aguiar et al, 2008). Posteriormente se encuentra la matriz de rigidez de la superestructura  $\mathbf{K}^{(s)}$  por ensamblaje directo (Aguiar, 2004).

La matriz de masas  $\mathbf{M}^{(s)}$  de la superestructura se halla evaluando la energía cinética de la estructura (Aguiar, 2007). Para el modelo numérico de cálculo indicado precedentemente, la forma de la matriz diagonal  $\mathbf{M}^{(s)}$  es la que se indica en la expresión (1).

$$\mathbf{M}^{(s)} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}^{(st)} & \\ & \mathbf{m}^{(sp)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

En la expresión anterior,  $\mathbf{m}^{(st)}$  es una matriz diagonal compuesta por la masa total del piso 1, la masa total del piso 2, la masa total del piso n,  $\mathbf{m}^{(sp)}$  es también diagonal compuesta por cada una de las masas discretas de la superestructura, desde la primera masa concentrada  $\mathbf{m}$ ,

hasta la última masa considerada en el modelo.

Una vez encontradas las matrices de masa  $M^{(s)}$  y de rigidez  $K^{(s)}$  se encuentra la matriz modal  $\Phi^{(s)}$  de la superestructura y se halla la matriz de amortiguamiento  $C^{(s)}$  de la subestructura con la ecuación (2)

$$C^{(s)} = M^{(s)} \Phi^{(s)} \hat{C}^{(s)} \Phi^{(s)t} M^{(s)} \quad (2)$$

La variable todavía no definida es  $\hat{C}^{(s)}$ , es una matriz diagonal con elementos que valen  $2\xi_i^{(s)} \omega_i^{(s)} m_i^{(s)}$ , donde  $\xi_i^{(s)}$  es el factor de amortiguamiento en el modo de vibración  $i$  de la superestructura, normalmente se trabaja con  $\xi_i^{(s)} = 0.05$ ;  $\omega_i^{(s)}$  es la frecuencia natural de vibración del modo  $i$  de la superestructura. Finalmente,  $m_i^{(s)}$  es la masa total de piso cuando el modo está asociado al desplazamiento horizontal o la masa puntual cuando el modo está asociado a una componente vertical.

#### 4.2 Matrices del sistema de aislamiento

Cada dispositivo de control posee tres rigideces según las direcciones X, Y, Z, debido a la presencia de los aisladores de resortes; como se aprecia a la izquierda de la Figura 12. También tiene tres factores de amortiguamiento, dos en sentido horizontal y uno en sentido vertical, debido a la presencia de los amortiguadores visco elásticos, como se observa a la derecha de la Figura 12.

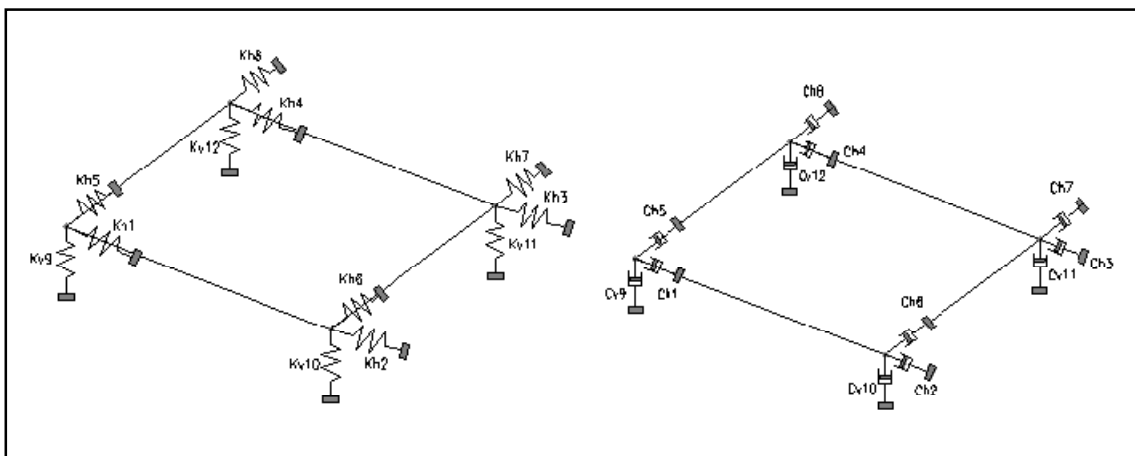


Figura 12. Rigidez y amortiguamiento de los dispositivos de protección sísmica

La matrices de rigidez,  $K^{(b)}$  y de masa,  $M^{(b)}$  del modelo propuesto pueden determinarse con las expresiones (3) y (4) respectivamente:

$$K^{(b)} = \begin{bmatrix} k_{hx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{hy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{vz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M^{(b)} = \begin{bmatrix} m^{(t)} & 0 & 0 \\ 0 & m^{(t)} & 0 \\ 0 & 0 & m^{(t)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

En las expresiones anteriores,  $\mathbf{k}_{hx}$ ,  $\mathbf{k}_{hy}$ ,  $\mathbf{k}_{vz}$  son submatrices diagonales, cuyos elementos son las rigideces de los aisladores helicoidales en sentido, horizontal en X, en Y, y vertical, respectivamente;  $\mathbf{m}^{(t)}$  es una submatriz diagonal, compuesta por cada una de las masas discretas.

Para el edificio estudiado,  $\mathbf{k}_{hx}$  es una sub matriz diagonal de cuatro por cuatro, cuyos términos de la diagonal son:  $\mathbf{k}_{h1}, \mathbf{k}_{h2}, \mathbf{k}_{h3}, \mathbf{k}_{h4}$ . Los elementos de  $\mathbf{k}_{hy}$  son  $\mathbf{k}_{h5}, \mathbf{k}_{h6}, \mathbf{k}_{h7}, \mathbf{k}_{h8}$  y los de  $\mathbf{k}_{vz}$  son  $\mathbf{k}_{v9}, \mathbf{k}_{v10}, \mathbf{k}_{v11}, \mathbf{k}_{v12}$ . Por otro lado, los elementos de la diagonal de la submatriz  $\mathbf{m}^{(t)}$  son:  $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \mathbf{m}_3, \mathbf{m}_4$ . Las masas discretas  $\mathbf{m}_i$  se obtienen en función del peso total de la superestructura, de la losa de aislación y del peso de cada aislador.

La matriz de amortiguamiento  $\mathbf{C}^{(b)}$  se obtiene en función de la matriz de masas  $\mathbf{M}^{(b)}$ , de los modos de vibración, que están agrupados en la matriz modal  $\Phi^{(b)}$  y del amortiguamiento del dispositivo visco elástico.

$$\mathbf{C}^{(b)} = \mathbf{M}^{(b)} \Phi \hat{\mathbf{C}}^{(b)} \Phi^t \mathbf{M}^{(b)} \quad (5)$$

En la expresión anterior  $\hat{\mathbf{C}}^{(b)}$  es una matriz diagonal compuesta por las submatrices que definen el amortiguamiento del dispositivo visco elástico.

$$\hat{\mathbf{C}}^{(b)} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{C}}_{hx} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{\mathbf{C}}_{hy} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{\mathbf{C}}_{vz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para el edificio analizado, los elementos de la diagonal de  $\hat{\mathbf{C}}_{hx}$  son  $\mathbf{C}_{h1}, \mathbf{C}_{h2}, \mathbf{C}_{h3}, \mathbf{C}_{h4}$ . En función del factor de amortiguamiento en sentido horizontal  $\xi_h$ , se tiene que los elementos de la diagonal de  $\hat{\mathbf{C}}_{hx}$  son  $2\xi_{hi} \omega_i \mathbf{m}_i$  para  $i$  de 1 a 4. El término  $\xi_{hi}$  es el factor de amortiguamiento en sentido X asociado al primer modo de vibración;  $\mathbf{m}_i$  es la masa discreta  $i$ ;  $\omega_i$  es la frecuencia de vibración para el modo  $i$ . Los valores de las submatrices  $\hat{\mathbf{C}}_{hy}$ ,  $\hat{\mathbf{C}}_{vz}$  son similares. Para la dirección Y se trabaja con el factor de amortiguamiento en sentido Y y para la dirección Z, con el factor de amortiguamiento vertical. Cada amortiguador visco elástico tiene tres factores de amortiguamiento, dos en sentido horizontal y uno en sentido vertical (Figura 12).

### 4.3 Sistema de ecuaciones diferenciales

El sistema de ecuaciones diferenciales tanto para el sistema de aislamiento como para la superestructura es el indicado por las expresiones (7) y (8) (Aguar et al, 2008).

$$\mathbf{M}^{(b)} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^{(b)} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^{(b)} \mathbf{q} = -\mathbf{M}^{(b)} \mathbf{r}^{(b)} \ddot{\mathbf{u}}_g - \mathbf{r}^{(s)t} \mathbf{M}^{(s)} \ddot{\mathbf{u}} \quad (7)$$

$$\mathbf{M}^{(s)} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}^{(s)} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}^{(s)} \mathbf{u} = -\mathbf{M}^{(s)} \mathbf{r}^{(s)} [\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{r}^{(b)} \ddot{\mathbf{u}}_g] \quad (8)$$

Donde  $\mathbf{q}$ ,  $\dot{\mathbf{q}}$ ,  $\ddot{\mathbf{q}}$  son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración del sistema de aislamiento;  $\mathbf{r}^{(b)}$  es un vector que relaciona los grados de libertad del sistema de aislamiento con la componente sísmica de movimiento del suelo;  $\mathbf{u}$ ,  $\dot{\mathbf{u}}$ ,  $\ddot{\mathbf{u}}$  son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración de los grados de libertad de la superestructura;  $\mathbf{r}^{(s)}$

es similar a  $r^{(b)}$  pero de la superestructura. Tanto el vector  $r^{(b)}$  como  $r^{(s)}$  están compuestos únicamente por 0 y 1. El 1 se halla en las coordenadas que están relacionadas con el movimiento del suelo. Finalmente  $\ddot{u}_g$  es la componente sísmica del movimiento del suelo. Si se está analizando el sismo horizontal será  $\ddot{u}_{gx}$ , para sismo vertical será  $\ddot{u}_{gz}$ .

Es importante destacar que los grados de libertad de la superestructura son desplazamientos relativos con respecto al movimiento del sistema de aislamiento. Por este motivo es que la matriz de masas es diagonal.

Como aproximación, en la solución del sistema de ecuaciones diferenciales para el aislamiento se considera que  $\ddot{u} = 0$ . Es decir que aceleración proveniente de la superestructura no influye en el movimiento del sistema de aislamiento (Kulkarni et al, 2002). Para encontrar la respuesta en el tiempo del sistema de aislamiento, con la citada hipótesis, se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales indicado en (9).

$$M^{(b)} \ddot{q} + C^{(b)} \dot{q} + K^{(b)} q = -M^{(b)} r^{(b)} \ddot{u}_g \quad (9)$$

Para encontrar la respuesta de la superestructura se trabaja con la ecuación diferencial completa (7) y (8).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Respuestas a nivel de los dispositivos de aislamiento

Con el método numérico descrito en el punto 4), se determinaron las respuestas para tres registros con características de falla cercana incluidas sus distintas componentes; terremoto de New Hall de 1994, estación Fire Station, terremoto de Northridge de 1994, estación Sylmar y terremoto de Kobe de 1995, estación JMA. En la Figura 13 se muestra la respuesta de desplazamientos horizontales en cada uno de los aisladores para el registro de New Hall y en la Figura 14 se presenta la respuesta en términos de desplazamientos verticales para el mismo registro.

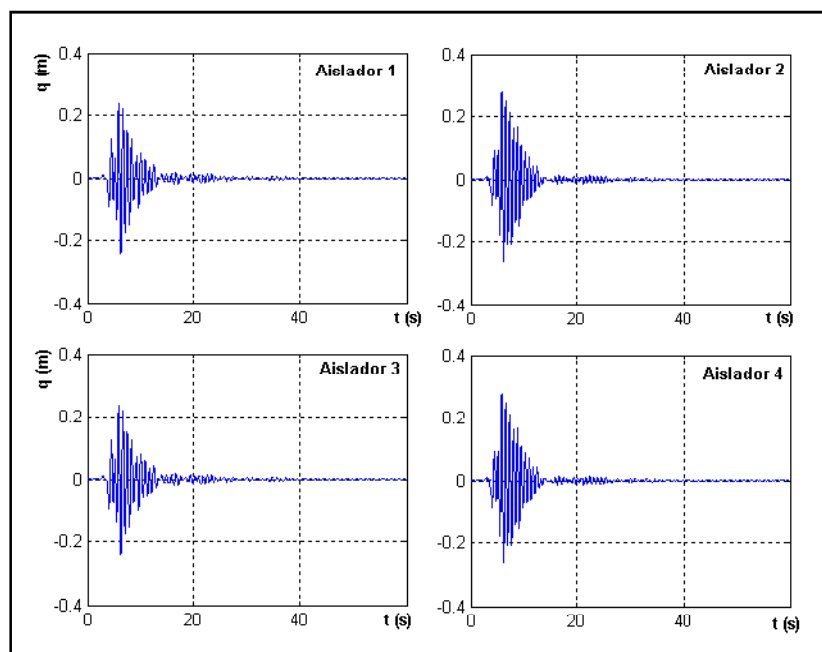


Figura 13. Desplazamientos en sentido X. Acelerograma de New Hall (1994), estación Fire Station

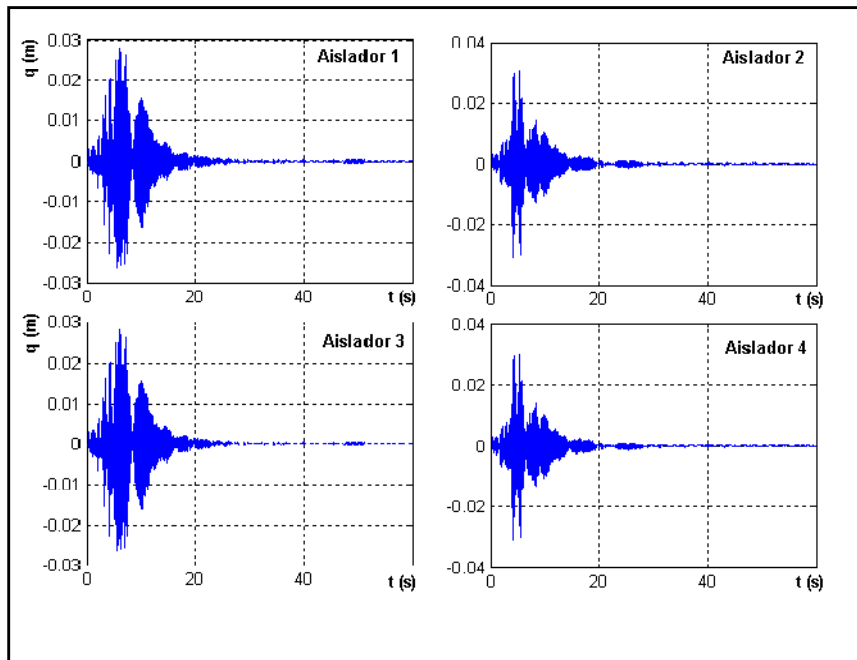


Figura 14. Desplazamientos en sentido vertical. Acelerograma de New Hall (1994), estación Fire Station

Las Figuras 15 y 16 indican, respectivamente, las mismas repuestas anteriores, pero para el terremoto de Northridge, estación de Sylmar. Por último en las Figuras 17 y 18 se muestran las repuestas citadas, pero para el terremoto de Kobe, estación de JMA.

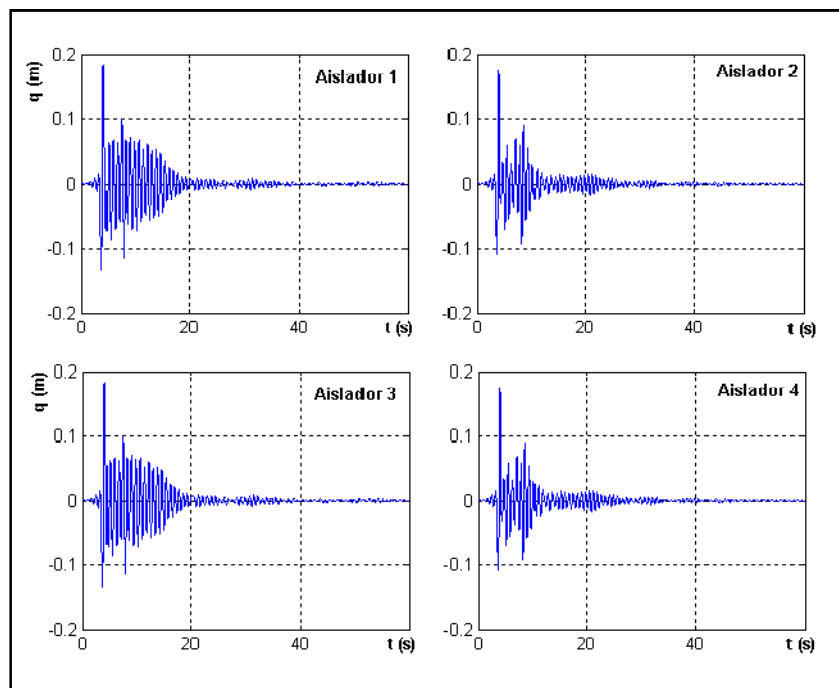


Figura 15. Desplazamientos en sentido X. Acelerograma de Northridge (1994), estación Sylmar



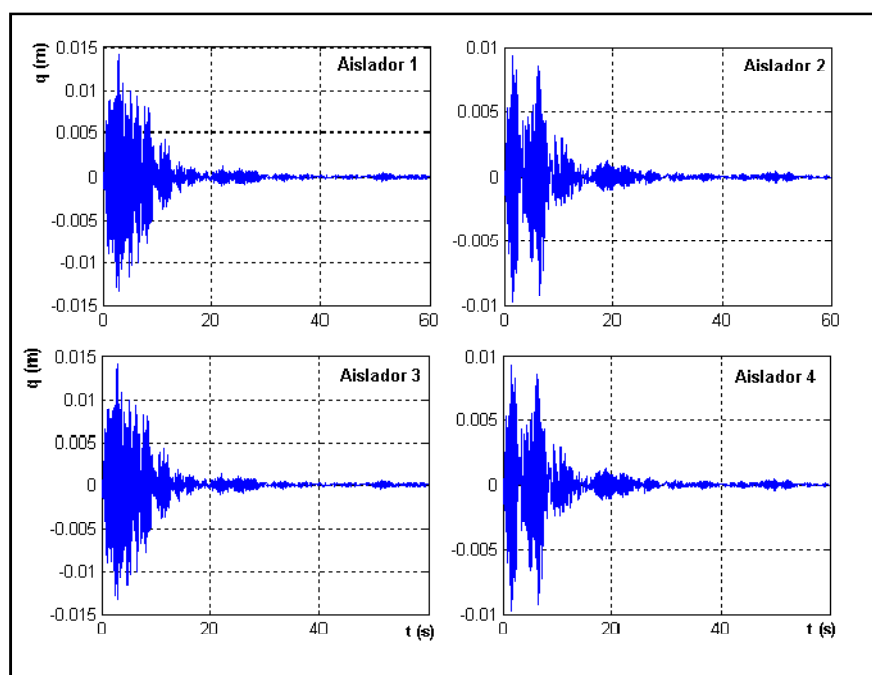


Figura 16. Desplazamientos en sentido vertical. Acelerograma de Northridge (1994), estación Sylmar.

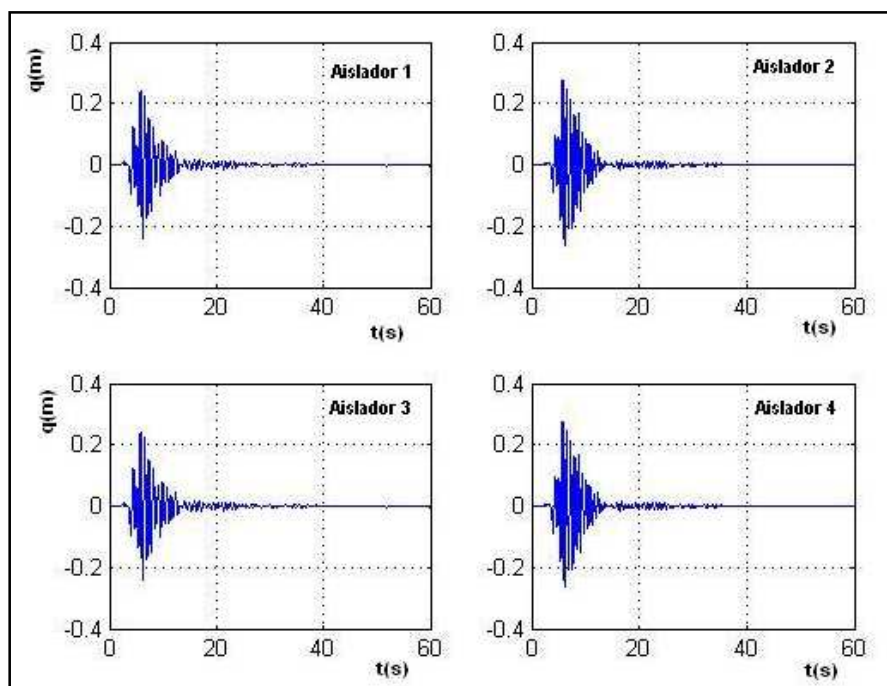


Figura 15. Desplazamientos en sentido X. Acelerograma de Kobe (1995), estación JMA.

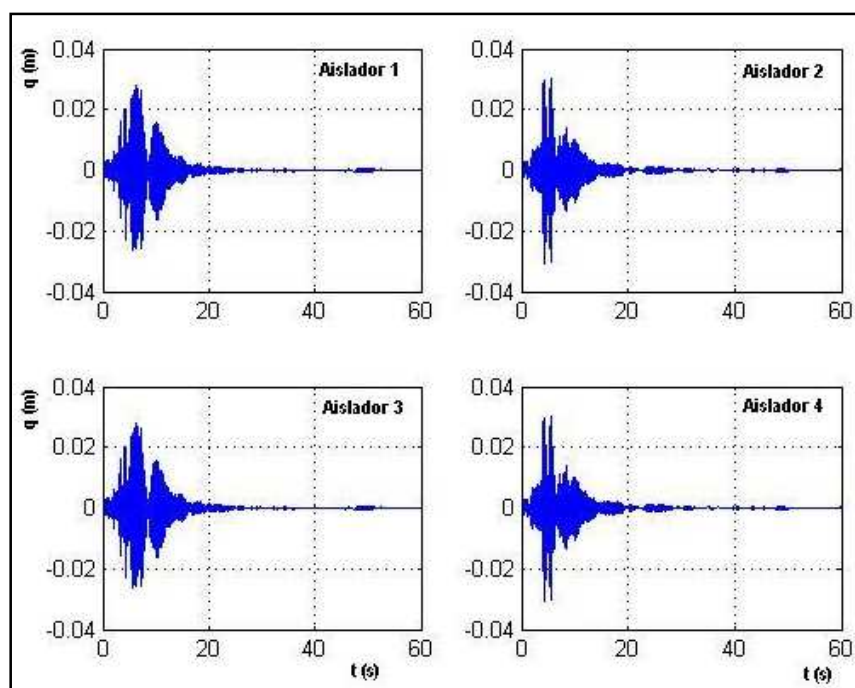


Figura 16. Desplazamientos en sentido vertical. Acelerograma de Kobe (1995), estación JMA.

## 5.2 Comportamiento de los dispositivos de protección sísmica

Los aisladores conformados por resortes presentan, como característica distintiva respecto a otros dispositivos frecuentemente utilizados, que su rigidez vertical es baja comparada, por ejemplo, con dispositivos del tipo friccionales o elastoméricos. Si se admite al edificio como un cuerpo rígido, apoyado sobre resortes helicoidales de acero y amortiguadores viscoelásticos, con rigidez horizontal,  $K_h$  y vertical  $K_v$  (valores indicados en Tabla 2), el edificio aislado presenta, como mecanismo de disipación de energía, modos pendulares, con centros de rotación superior e inferior, como los indicados en la Figura 17 (Tornello y Sarrazin, 2007).

En el mecanismo de disipación de energía los desplazamientos verticales de los dispositivos de aislamiento de dos aisladores ubicados en un extremo, son diferentes a los otros dos ubicados en el extremo opuesto. Es decir que mientras los aisladores ubicados en las posiciones coincidentes con los grados de libertad 9 y 12 suben, los emplazados en las direcciones coincidentes con los grados de libertad 10 y 11 se comprimen. Los grados de libertad a nivel de dispositivos de aislamiento se indican en Figura 9.

La respuesta obtenida en términos de desplazamientos verticales, para el terremoto de New Hall, se muestra en la Figura 18, la del terremoto de Northridge, estación Sylmar en la Figura 19 y por último, la del terremoto de Kobe, estación JMA, en la Figura 20.

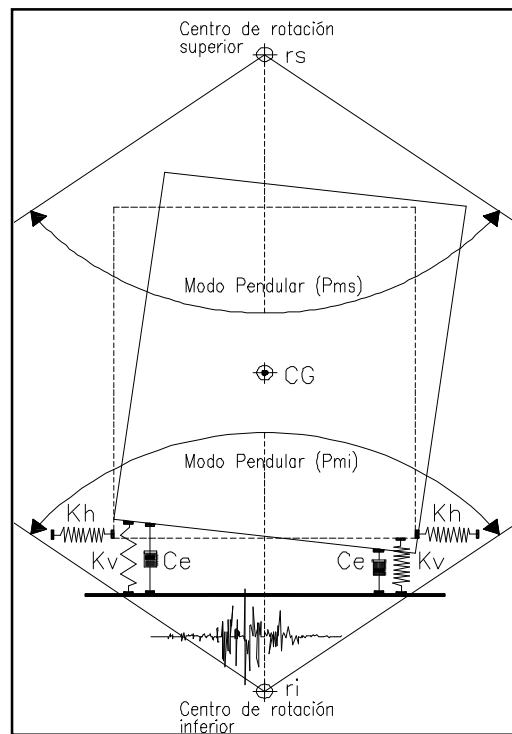


Figura 17. Mecanismo de disipación de los dispositivos de aislamiento. Modos pendulares.

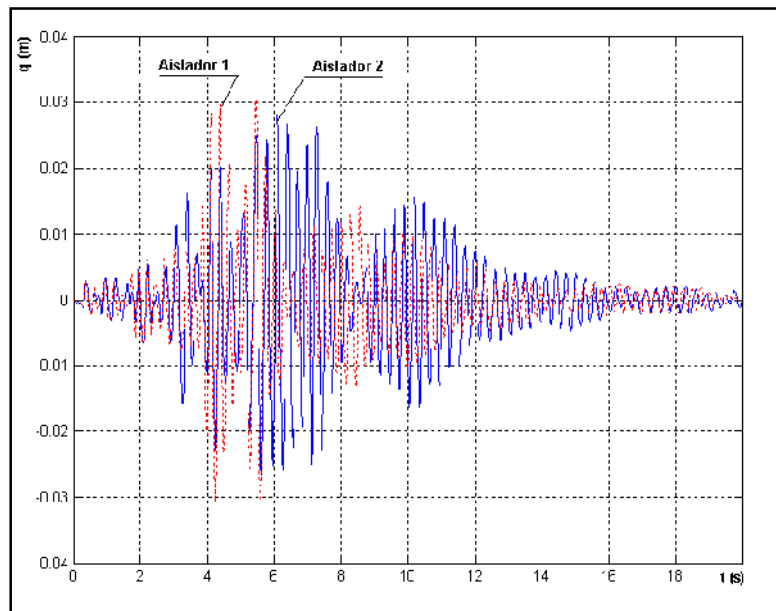


Figura 18. Desplazamientos verticales en dos aisladores emplazados en extremos opuestos. Acelerograma de New Hall (1994), estación Fire Station.

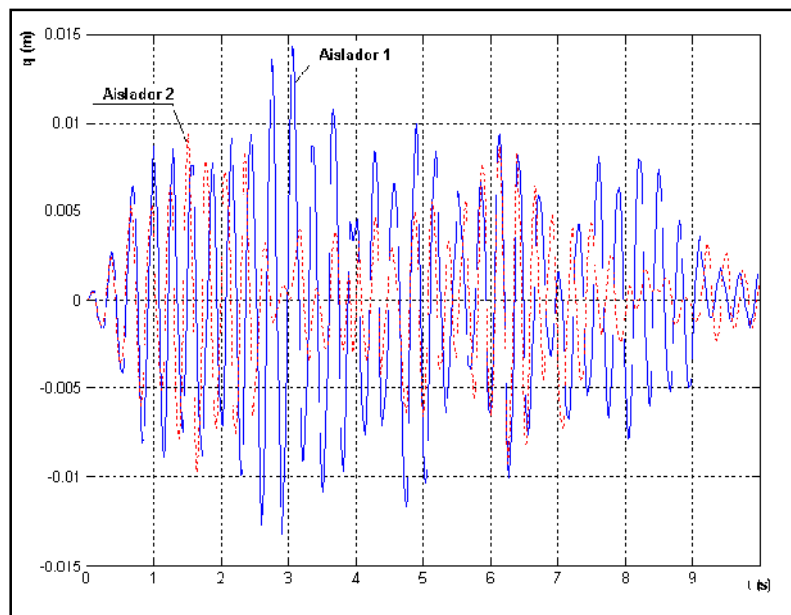


Figura 19. Desplazamientos verticales en dos aisladores emplazados en extremos opuestos. Acelerograma de Northridge (1994), estación Sylmar.

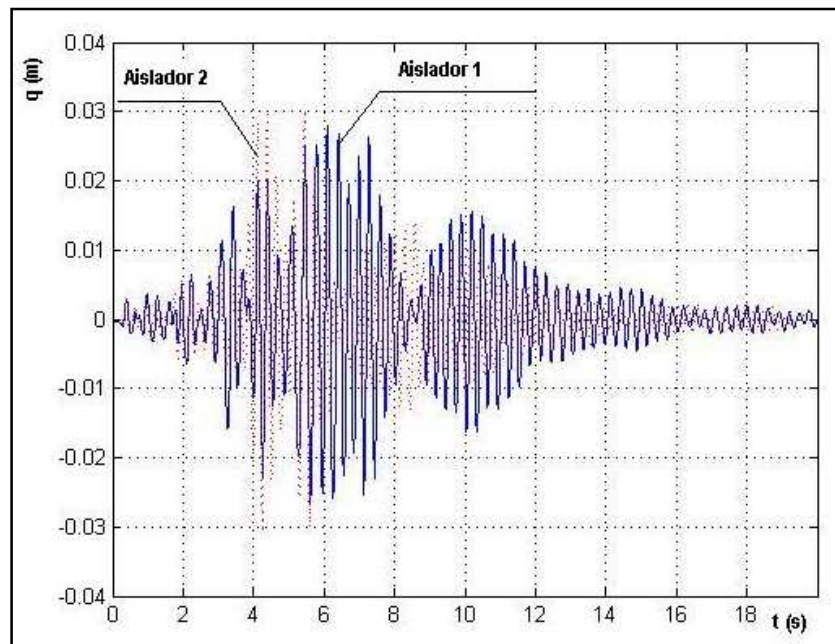


Figura 20. Desplazamientos verticales en dos aisladores emplazados en extremos opuestos. Acelerograma de Kobe (1995), estación JMA

### 5.3 Aceleraciones de ingreso a la superestructura

La respuesta medida en la superestructura,  $\ddot{\mathbf{q}}$ , es función del acelerograma definido por la excitación sísmica,  $\ddot{\mathbf{u}}_g$ . Las dos aceleraciones se muestran en las Figuras 21, 22 y 23, para los terremotos de New Hall, Sylmar y Kobe, respectivamente. En la parte superior de las figuras se representa la historia de aceleraciones horizontales, mientras que en la parte inferior se indica la historia de aceleraciones verticales.

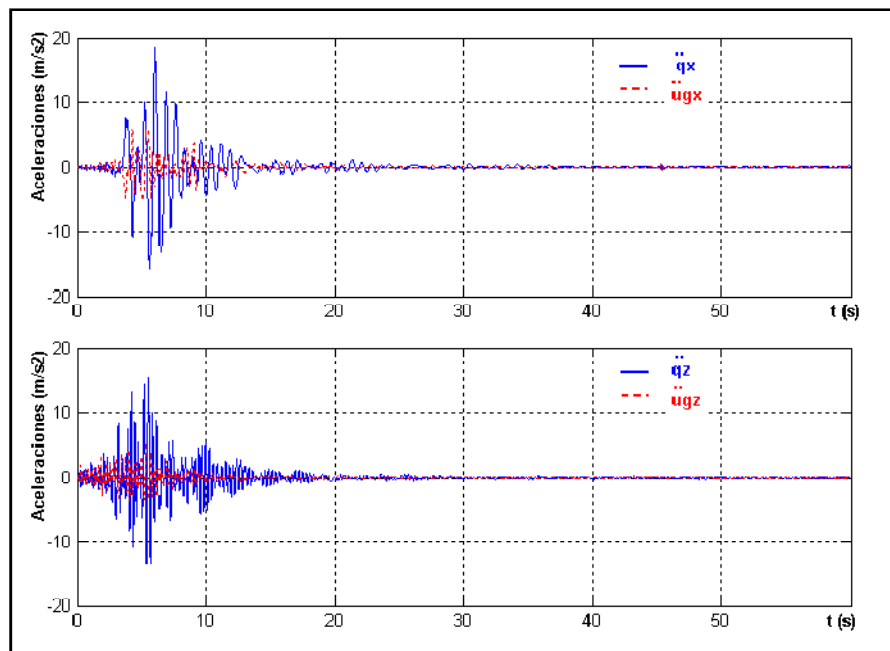


Figura 21. Aceleraciones que ingresan a superestructura. Registro de New Hall, estación Fire Station

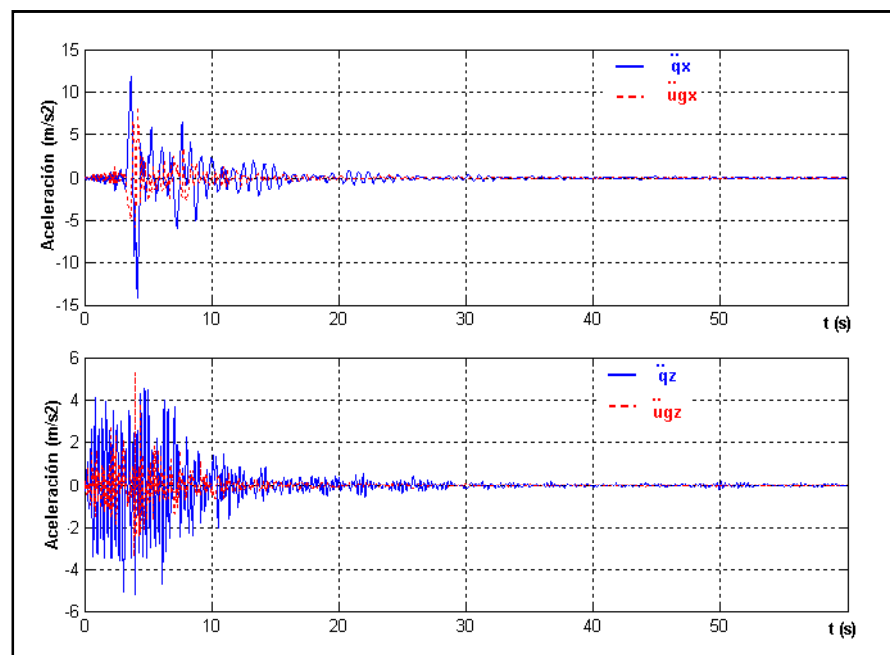


Figura 22. Aceleraciones que ingresan a superestructura. Registro de Northridge, estación Sylmar

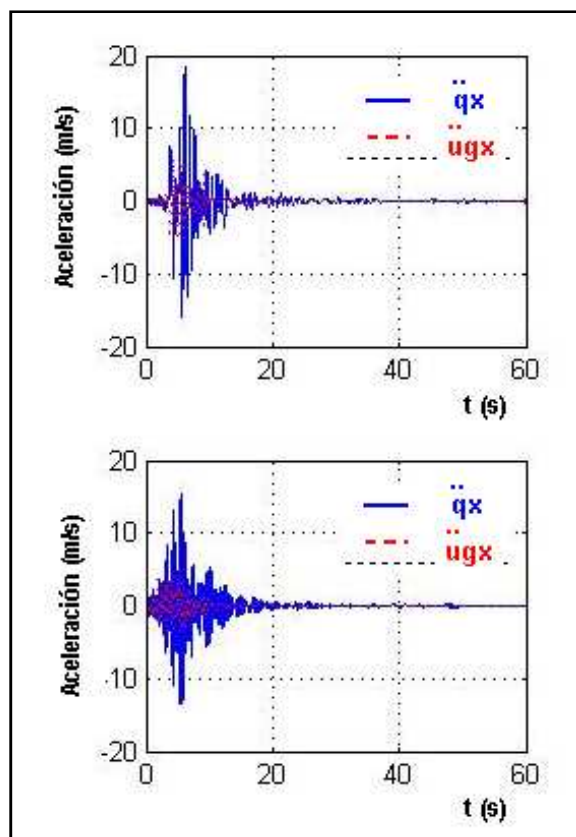


Figura 23. Aceleraciones que ingresan a superestructura. Registro de Kobe, estación JMA

De las gráficas se deduce que, en general, hay una amplificación de las aceleraciones horizontales y verticales medidas inmediatamente por encima de los dispositivos de aislamiento. Resultados para un número mayor de terremotos y una comparación de las aceleraciones del edificio aislado con relación al mismo de base fija puede encontrarse en Tornello y Sarrazin, 2007. La amplificación de las aceleraciones horizontales está asociada a un mayor amortiguamiento del sistema de aislamiento y depende de las características y contenidos de frecuencia de los acelerogramas que se utilicen para evaluar las respuestas en la superestructura (Tornello y Sarrazin, 2008).

#### 5.4 Respuestas en la superestructura

La historia de la respuesta en término de desplazamientos horizontales, en cada nivel del edificio, se indica en Figura 24, para el acelerograma de New Hall. En Figura 25 se muestra el obtenido para el registro de Sylmar y por último en Figura 26 para el terremoto de Kobe, estación JMA. Los desplazamientos que muestran las gráficas son relativos con respecto al corrimiento de los dispositivos de control.

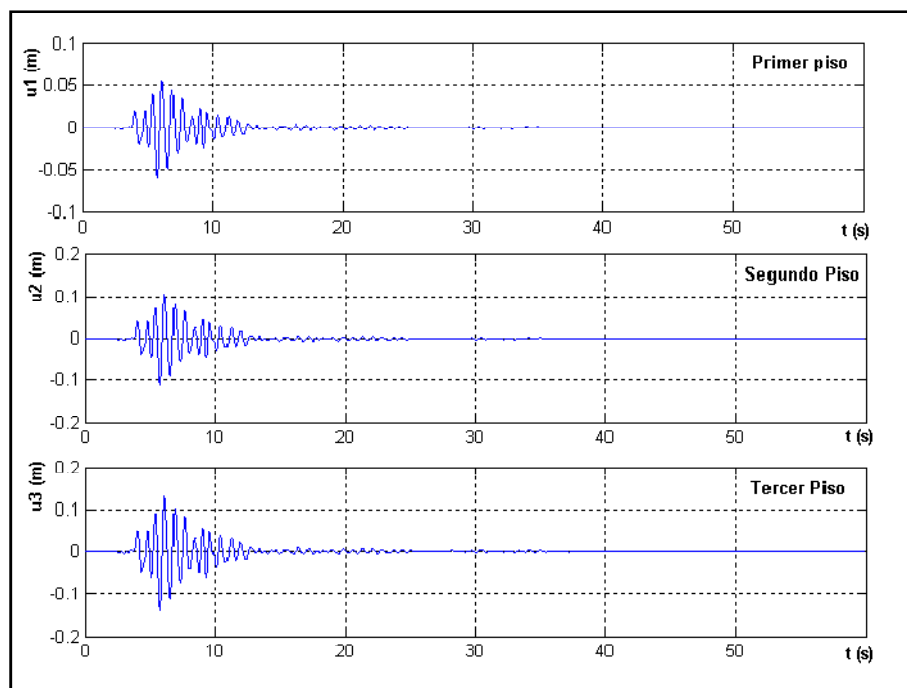


Figura 24. Desplazamientos horizontales en la superestructura. Registro de New Hall, estación Fire Station

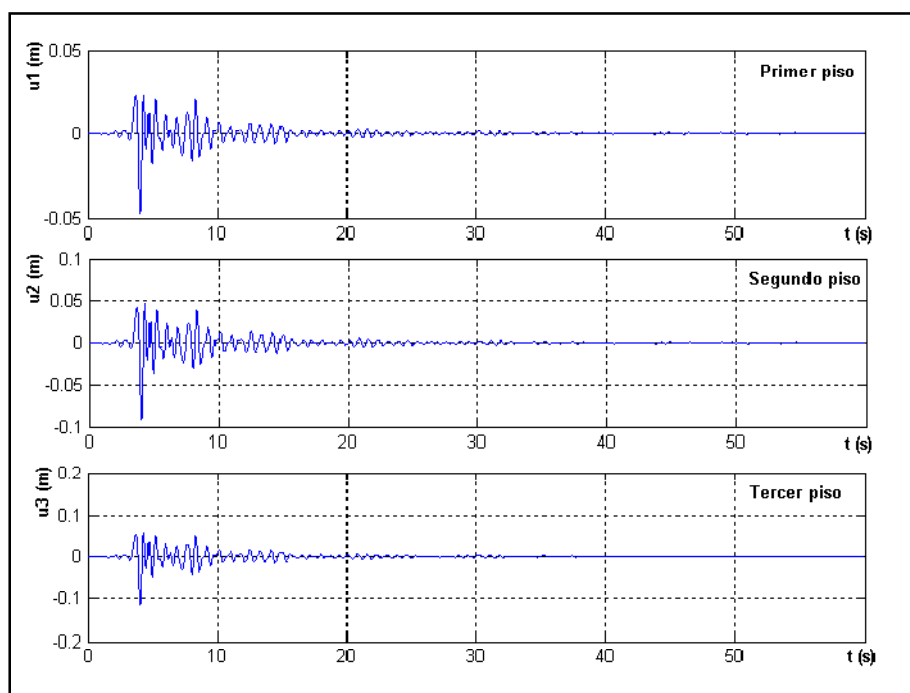


Figura 25. Desplazamientos horizontales en la superestructura. Registro de Northridge, estación Sylmar



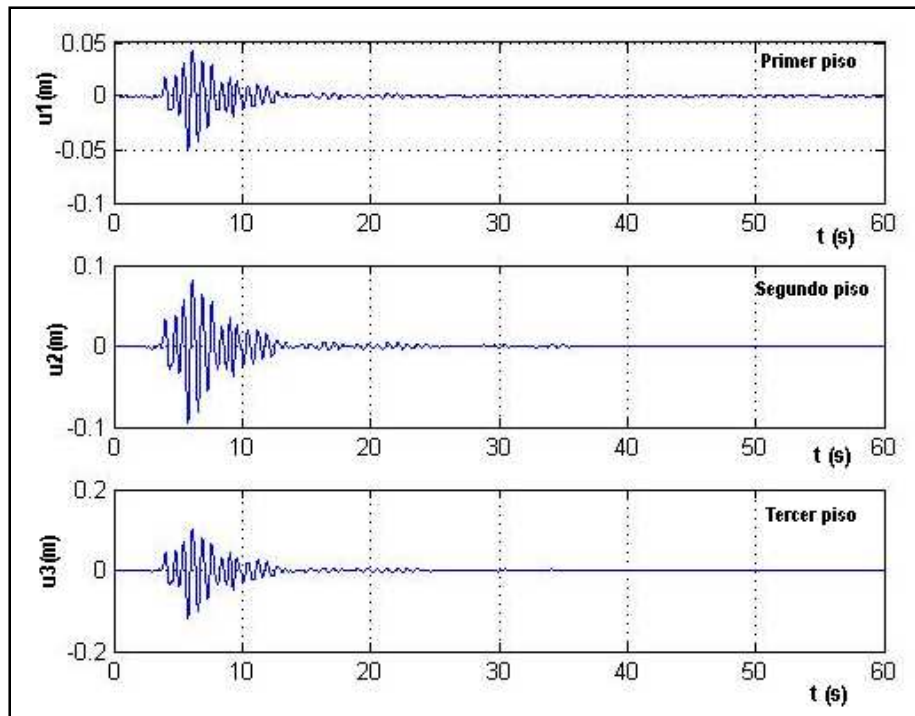


Figura 26. Desplazamientos horizontales en la superestructura. Registro de Kobe, estación JMA

En las Figuras 27, 28 y 29 se muestran los desplazamientos verticales en cada nivel del edificio, para los terremotos de New Hall, Sylmar y Kobe, respectivamente. Los resultados indican que los desplazamientos verticales de la superestructura son prácticamente despreciables comparados con los desplazamientos horizontales de la misma.

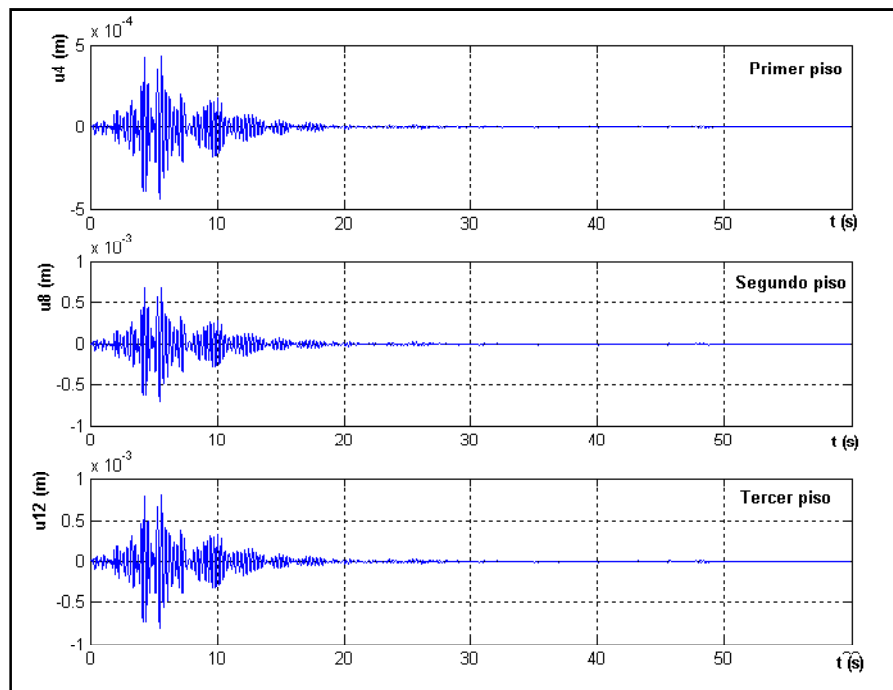


Figura 27. Desplazamientos verticales en la superestructura. Registro de New Hall, estación Fire Station.

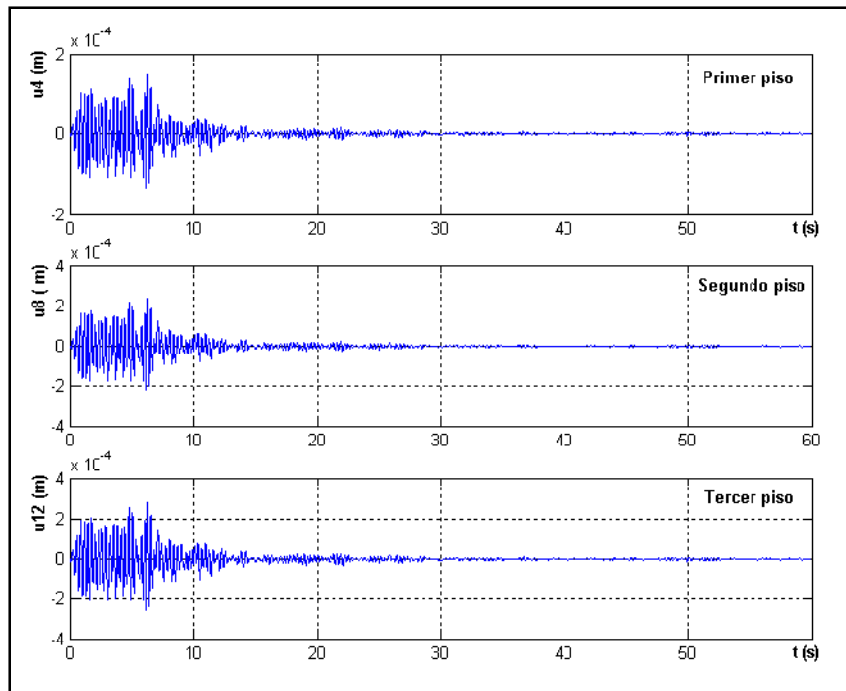


Figura 28. Desplazamientos verticales en la superestructura. Registro de Northridge, estación Sylmar.

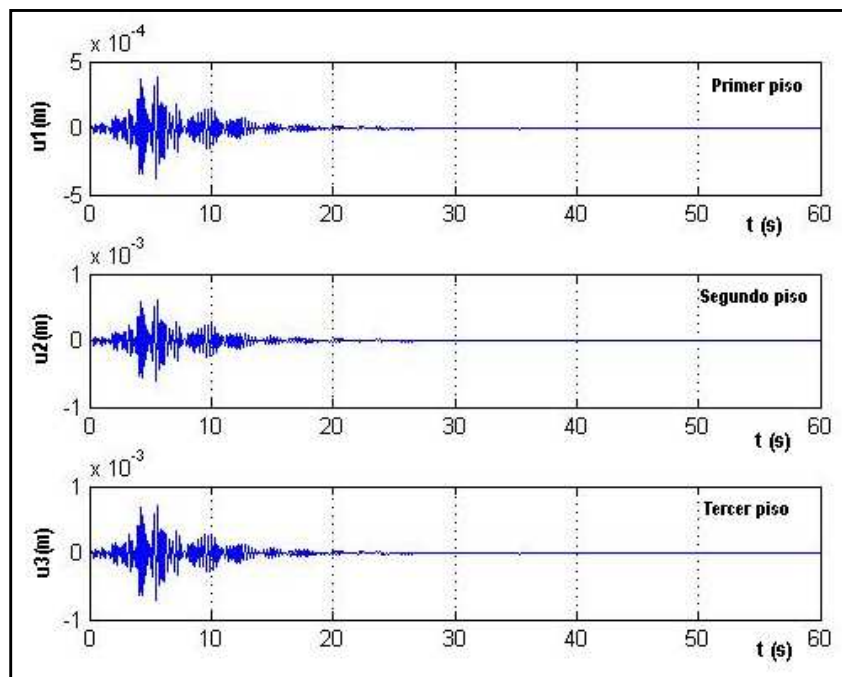


Figura 29. Desplazamientos verticales en la superestructura. Registro de Kobe, estación JMA.

## 5.5 Comparación de resultados

En la Tabla 3 se comparan las respuestas en términos de desplazamientos horizontales ( $q_h$ ) y verticales ( $q_v$ ) en cada nivel del edificio, obtenidos con la metodología desarrollada en el presente trabajo y con los resultados obtenidos del modelo del SAP 2000 (Tornello y

Sarrazin, 2007). El nivel indicado como (0) en la tabla, corresponde al nivel de los dispositivos de protección.

Nivel	Terremoto de New Hall Estacion Fire Station				Terremoto de Northridge Estación Sylmar				Terremoto de Kobe Estación JMA			
	Modelo propuesto		SAP2000		Modelo propuesto		SAP2000		Modelo propuesto		SAP2000	
	$q_h$ (m)	$q_v$ (m)	$q_h$ (m)	$q_v$ (m)	$q_h$ (m)	$q_v$ (m)	$q_h$ (m)	$q_v$ (m)	$q_h$ (m)	$q_v$ (m)	$q_h$ (m)	$q_v$ (m)
3	0.340	0.031	0.322	0.083	0.266	0.017	0.267	0.051	0.310	0.017	0.352	0.058
2	0.320	0.031	0.278	0.083	0.246	0.017	0.226	0.051	0.282	0.016	0.320	0.058
1	0.283	0.031	0.234	0.082	0.209	0.016	0.184	0.051	0.250	0.016	0.288	0.057
0	0.240	0.030	0.189	0.081	0.170	0.015	0.144	0.050	0.198	0.015	0.255	0.057

Tabla 3: Comparativa entre los desplazamientos horizontales y verticales en cada nivel del edificio

En la Tabla 4 se comparan las respuestas en términos de aceleraciones horizontales ( $\ddot{q}_h$ ) y verticales ( $\ddot{q}_v$ ), inmediatamente por encima de los dispositivos de protección, obtenidas con la metodología desarrollada en el presente trabajo y con los resultados obtenidos del modelo del SAP 2000 (Tornello y Sarrazin, 2007). El nivel indicado como (-1), en la tabla, corresponde a la aceleración del terreno.

Nivel	Terremoto de New Hall Estacion Fire Station				Terremoto de Northridge Estación Sylmar				Terremoto de Kobe Estación JMA			
	Modelo propuesto		SAP2000		Modelo propuesto		SAP2000		Modelo propuesto		SAP2000	
	$\ddot{q}_h$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ddot{q}_v$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ddot{q}_h$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ddot{q}_v$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ddot{q}_h$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ddot{q}_v$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ddot{q}_h$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ddot{q}_v$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ddot{q}_h$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ddot{q}_v$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ddot{q}_h$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ddot{q}_v$ (m/s <sup>2</sup> )
1	15.88	13.48	10.76	9.62	11.79	4.54	9.85	3.62	13.11	6.06	9.61	5.44
-1	5.41	5.37	5.41	5.37	8.27	5.25	8.27	5.25	8.20	3.33	8.20	3.33

Tabla 4: Comparativa entre aceleraciones horizontales y verticales por encima de los dispositivos de protección.

## 6 CONCLUSIONES

El método numérico desarrollado permite determinar, para una estructura aislada con resortes de acero y amortiguadores visco elásticos, las respuestas en el tiempo de los desplazamientos horizontales y verticales a nivel de los dispositivos de aislamiento y en cada nivel de la superestructura a través de un algoritmo de simple programación y mediante una formulación sencilla y compacta.

Las respuestas en términos de desplazamientos horizontales obtenidas con el modelo que propone el presente trabajo y el SAP2000 son, desde el punto de vista práctico, equivalentes, sin embargo, se observan diferencias para los valores de desplazamientos verticales. Sería conveniente extender el estudio a un número mayor de terremotos.

El método desarrollado permite valorar, además de los desplazamientos, las aceleraciones por encima de los dispositivos de aislamiento con suficiente aproximación en relación a los resultados encontrados con otras herramientas (SAP2000).

La metodología propuesta conduce a desplazamientos verticales diferenciales entre dos extremos opuestos del edificio aislado situación que, pone en evidencia, el efecto rotacional y los modos pendulares de la estructura como característica distintiva del sistema de aislamiento compuesto por resortes de acero y amortiguadores visco elásticos.

Los resultados obtenidos con el modelo numérico que presenta el trabajo, tanto a nivel de dispositivos de aislamiento como en los distintos niveles de la superestructura, permite contar con un modelo base para generar el estudio de otras respuestas además de los desplazamientos y aceleraciones estudiadas en el presente trabajo.

## REFERENCIAS

- Aguiar R., *Análisis Matricial de Estructuras*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, Tercera Edición, 550 p., Quito, Ecuador, 2004.
- Aguiar R., *Dinámica de estructuras con MATLAB*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 292 p., Quito, Ecuador, 2007.
- Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P. y Suárez V. *Aisladores de base Elastoméricos y FPS*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 292 p., Quito, Ecuador. (2008),
- Bozzo L. M. y Barbat A. H., *Diseño Sismorresistente de edificios. Técnicas convencionales y avanzadas*. Editorial Reverté. Barcelona. España. Capítulo 8. pp. 275, 2000.
- ICBO UBC. SC 1997 Uniform Building Code. International Conference of Building Officials, 1997.
- Jangid R. S. y 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, 1993 y 1996 2º edición.
- Kulkarni J. y Jangrid R., Rigid body response of base-isolated structures. *Journal of Structural Control* (9), 171-188, 2002.
- 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.
- Naeim F. y KELLY J. M., *Design of Seismic Isolated Structures*. Edit. John Wiley & Sons, Inc. Printed in the United States of America, 1999.
- Nawrotzki P. Seismic Protection of structures by viscoelastic elements. *The Eighth Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. Nanyang Technological University. Singapore, 2001.
- Nawrotzki P. Passive Control Systems for Building in Seismically Active Regions. *ECCM-2001. European Conference on Computational Mechanics*. Cracow. Poland. 2001.
- Skinner, R. I.; Robinson W. H. y Mc Verry, G. H. *An Introduction to Seismic Isolation*. John Wiley & Sons. Chichester, 1993.
- Stuardi, J. Dispositivos viscoelásticos para protección sísmica de edificios: Residencia Estudiantil en Mendoza. XI Seminario Iberoamericano de Ingeniería Sísmica y 6º Encuentro de Investigadores y Profesionales argentinos de la construcción, arquitectura y diseño sismorresistente. CD. Facultad de Ingeniería UNC y Asociación Argentina de Ingeniería Sísmica, 2003.
- Stuardi J., Massa J. y Brewer A. Eficiencia de Sistemas de Aislamiento Sísmico basados en

- resortes helicoidales y amortiguadores viscosos comparada con aisladores tradicionales goma – metal. *VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional*. CD. 16-18 noviembre 2005.
- Tornello M. y 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 UTN. *Revista Internacional de Estructuras*. Editores: Barbat A., Aguiar R.. Vol. 9, N° 1. pp. 71-91. Ecuador. SIN 1390-0315, 2004.
- Tornello, M. y 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 N° A13-04. CD. SIN 07118-2678, 2005.
- Tornello M. y Sarrazin A. M., Dynamic response of a building with base isolation for near-fault motions. *9<sup>th</sup> Canadian Conference on Earthquake Engineering*. Paper N° 1057. Ottawa. CAEE, ACEP., 2007.
- Tornello M. y Sarrazin A. M., *Influencia del amortiguamiento en la respuesta de estructuras con aislamiento sísmico de base*. XVIII Congreso sobre métodos numéricos y sus aplicaciones. ENIEF 2008. Paper N° 115-879-1-DR, 2008.
- Wolff E. y Constantinou M.C., Experimental Study of Seismic Isolation Systems with Emphasis on Secondary System Response and Verification of Accuracy or Dynamic Response History Analysis Methods, *Structural and Environmental Engineering. Technical Report MCRRT-04-001*. University at Buffalo, State University of New York. Department of Civil, 2004.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Tecnológica Nacional y a la Universidad Politécnica del Ejército del Ecuador por el apoyo brindado a los autores para el desarrollo del presente trabajo de investigación.