

Aislamiento sísmico. Una estrategia eficiente para el cambio de paradigma en la Ingeniería Estructural Sismorresistente

Seismic isolation. An efficient strategy for change of paradigm in earthquake resistant structural engineering

Miguel Eduardo Tornello¹; Gustavo Gioacchini¹

Resumen

En la República Argentina más de las dos terceras partes de su territorio está expuesto al riesgo sísmico. Estudios realizados sobre sismicidades locales y regionales han demostrado el elevado peligro sísmico de importantes provincias del oeste argentino, algunos ejemplos son Mendoza, San Juan, Salta y Jujuy, entre otras. La región conocida como Gran Mendoza, cuenta actualmente, con más de un millón de habitantes y presenta una significativa historia sísmica. En los últimos 200 años han ocurrido no menos de 15 terremotos que ocasionaron distintos niveles de daños en las construcciones y en algunos casos se ha tenido que lamentar la pérdida de vidas humanas. El antecedente histórico más conocido es el terremoto de 1861, que provocó la destrucción total de la ciudad y ocasionó la muerte del 60 % de las personas que la habitaban. El avance tecnológico de los últimos años ha permitido contar con nuevas estrategias para reducir y controlar el efecto de los terremotos destructivos sobre las construcciones emplazadas en regiones con riesgo sísmico. El aislamiento sísmico es una de esas estrategias.

El trabajo presenta la teoría básica del aislamiento sísmico realiza una revisión de los dispositivos de aislamiento más comúnmente utilizados a nivel mundial. Se presenta además una aplicación concreta de aislamiento sísmico para un edificio de tres niveles, de construcción típica en zona sísmica, en el cual se utilizaron dispositivos de aislamiento distintos a los habitualmente empleados en otras zonas sísmicas del continente. Para todos los casos se desarrolla el marco teórico que permite predecir la respuesta sísmica de la construcción aislada. El

Citar: Tornello, M. E. y Gioacchini, G. (2018). Aislamiento sísmico. Una estrategia eficiente para el cambio de paradigma en la Ingeniería estructural sismorresistente. *Cuadernos de Ingeniería. Nueva Serie.* [Salta- Argentina, núm. 12: 57-104.

¹ Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTec). Departamento de Ingeniería Civil, UTN Facultad Regional Mendoza.

trabajo se completa con información sobre la respuesta del edificio diseñado localmente frente a sismos sensibles ocurridos en la región y su comparación con un edificio idéntico, pero de base fija. Los resultados indican las ventajas del aislamiento sísmico en relación con los sistemas constructivos utilizados tradicionalmente.

Palabras clave: protección sísmica - aislamiento sísmico - terremotos

Abstract

In Argentine Republic, a large part of its territory is exposed to seismic risk. Local and regional seismological studies have shown the high seismic risk of important provinces of western Argentina, some examples are Mendoza, San Juan, Salta and Jujuy, among others. The region known as Gran Mendoza, currently has more than one million population and presents a significant seismic history. In the last 200 years there have been about 15 earthquakes that caused different levels of damage to buildings and in some cases have caused loss of human life. The best known historical antecedent is the earthquake of 1861, which caused the total destruction of the city and the death of 60% of the population. The technological advance of the last years has allowed to have new strategies to reduce and control the effect of destructive earthquakes on the constructions located in regions with seismic risk. Seismic isolation is one of those strategies. The paper presents the basic theory of seismic isolation, performs a review of the most commonly used isolation devices worldwide. In addition, a seismic isolation application for a three-level building of typical construction in a seismic zone is presented in which isolation devices different from those usually used in other seismic zones of the world were used. The paper is completed with information on the response of the building designed locally to sensitive earthquakes in the region and its comparison with an identical building, but with a fixed base. The results show the advantages of seismic isolation in relation to the constructive systems traditionally used.

Keywords: seismic protection - seismic isolation - earthquake

1. Introducción

Hoy, muchos proyectos de ingeniería utilizan técnicas modernas para controlar los efectos de los terremotos, entre ellas, los sistemas pasivos de control de vibraciones (disipadores de energía) y la técnica del aislamiento sísmico (Martelli, 2005) han sido las más utilizadas. Ambas constituyen herramientas eficientes para garantizar la seguridad de las construcciones frente a la ocurrencia de los terremotos. La protección no solo 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.

El objetivo fundamental el aislamiento sísmico consiste en desacoplar la estructura del suelo de fundación, con el objeto de que el movimiento del terreno durante un sismo no sea transmitido a la superestructura y que ella permanezca esencialmente detenida en un marco de referencia inercial (Figura1). Por cierto, un desacople perfecto entre suelo y estructura es im-

practicable actualmente, sin embargo, cualquier sistema de aislamiento busca concentrar en él la deformación impuesta por el movimiento del suelo, filtrando el movimiento que se trasmite hacia la superestructura (Tornello, 2007).

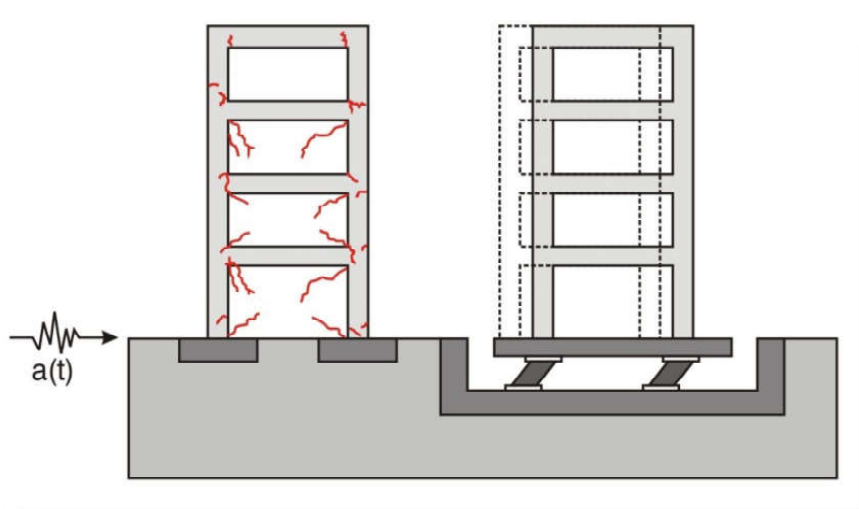


Figura 1. Respuesta de una estructura convencional y una aislada.

Los sistemas de protección sísmica trabajan bajo dos estrategias. La primera es mediante una disipación controlada de la energía que entrega el terremoto y la segunda se concreta a través de modificar las características dinámicas de la obra que se quiere proteger. En algunos casos también se utiliza una combinación de ambas estrategias. La disipación de energía se logra mediante un aumento del amortiguamiento mientras que la segunda, se logra aumentando el periodo y también el amortiguamiento. En la Figura 2, se observa de manera gráfica las estrategias de protección de las estructuras para una idealización de un espectro de aceleraciones y de desplazamientos.

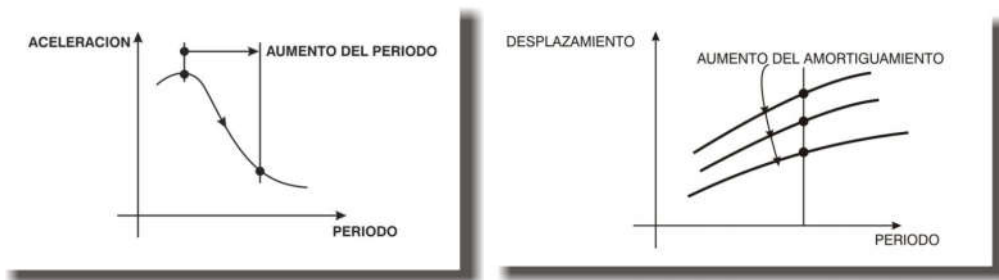


Figura 2. Estrategias de la técnica de los sistemas de protección sísmica

Una de las formas de adicionar amortiguamiento es a través de la disipación de energía denominada histéresis. Esta disipación de energía está representada por el área encerrada entre las curvas de carga y descarga, para el caso de cargas cíclicas. El trabajo realizado durante la etapa de carga, no es totalmente recuperado durante la descarga y la diferencia se pierde, o disipa como calor. La Figura 3 muestra un ciclo idealizado de fuerza versus desplazamiento, donde el área encerrada es una medida de la energía disipada durante un ciclo de movimiento.

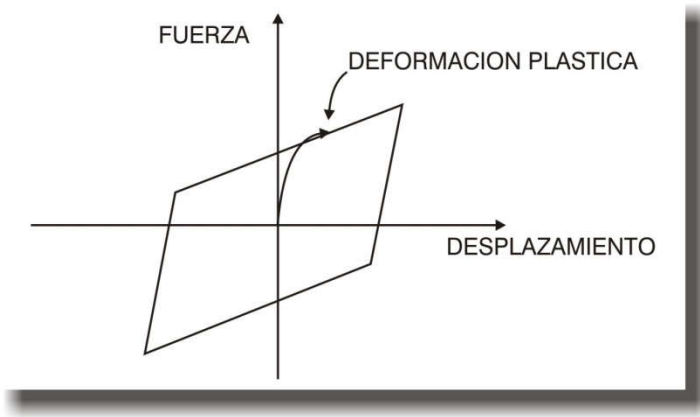


Figura 3. Ciclo de histéresis debido a una deformación plástica.

La implementación de dispositivos 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, situación que garantiza la estabilidad de la estructura aislada, la supervivencia de sus ocupantes y la salvaguarda de sus contenidos.

La estrategia del aislamiento sísmico resulta más conveniente en estructuras con bajos periodos y rigidices importantes. Atento a dicha observación el aislamiento sísmico perseguirá entonces dos objetivos fundamentales, el primero es incrementar el periodo de la construcción y el segundo objetivo será proveerle un mayor amortiguamiento para controlar los desplazamientos de las estructuras aisladas.

2. Base teórica del aislamiento sísmico

El sistema de aislamiento sísmico más simple es aquel en el cual la masa m se encuentra soportada por un dispositivo de baja rigidez a los desplazamientos horizontales x , el cual cumple la función de aislar a la masa de la excitación externa. La acción exterior del terremoto puede representarse por un desplazamiento del suelo con variación sinusoidal u_g . (Figura 4) (Kelly, 1993, 1996).

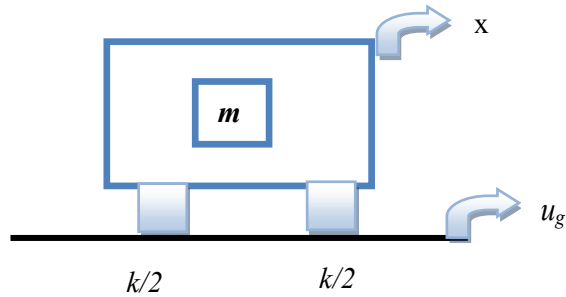


Figura 4. Representación esquemática del aislamiento sísmico.

La efectividad del aislamiento sísmico para proporcionar una protección frente a las vibraciones de la masa m , se cuantifica mediante el concepto de transmisibilidad (T) (ecuación 1 y 2) y se define como la relación entre el valor máximo de los desplazamientos absolutos de la masa y del suelo. La variación de los desplazamientos en el tiempo de la excitación exterior, se admite del tipo sinusoidal (ecuación 1) como también la respuesta en términos de desplazamientos de la masa m (ecuación 2).

$$u_g = \bar{u}_g e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$x = \bar{x} e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$T = \frac{\bar{x}}{\bar{u}_g} \quad (3)$$

Donde: \bar{x} = Máximo desplazamiento de la masa.
 \bar{u}_g = Desplazamiento máximo absoluto del terreno.
 ω = Frecuencia de la excitación exterior.

La transmisibilidad puede definirse también en término de una relación de aceleraciones absolutas, es decir:

$$\ddot{u}_g = \bar{a}_g e^{i\omega t} \quad (4)$$

$$\ddot{x} = \bar{a} e^{i\omega t} \quad (5)$$

$$T = \frac{\bar{a}}{\bar{a}_g} \quad (6)$$

\bar{a} = Máximo aceleración de la masa.
 \bar{a}_g = Aceleración máxima absoluta del terreno.

La ecuación de movimiento de la masa, sujeta a la acción del movimiento del suelo, se expresa mediante la ecuación (7). Luego si se define la razón de amortiguamiento crítico por la (8) y la frecuencia natural con (9), la ecuación de movimiento queda expresada con la forma indicada en la (10).

$$m \ddot{x} = -c(\dot{x} - \dot{u}_g) - k(x - u_g) \quad (7)$$

$$\beta = \frac{c}{2\omega_o m} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (8)$$

$$\omega_o^2 = \frac{k}{m} \quad (9)$$

$$\ddot{x} = -2\omega_o \beta(\dot{x} - \dot{u}_g) - \omega_o^2(x - u_g) \quad (10)$$

Los valores de u_g y x han sido definidos por las ecuaciones (1) y (2) respectivamente, por lo tanto la expresión de amplitud de transmisibilidad queda:

$$\frac{\bar{x}}{\bar{u}_g} = \frac{1 + 2i\beta\Omega}{1 + 2i\beta\Omega - \Omega^2} \quad (11)$$

Donde: $\Omega = \frac{\omega}{\omega_o}$

ω = frecuencia de la excitación exterior.

ω_o = frecuencia propia del sistema.

El cociente de la suma de complejos tiene solución en el campo real, por lo que la expresión de la amplitud de la transmisibilidad queda expresada por la ecuación (12):

$$T = \left[\frac{1 + 4\beta^2 \Omega^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2} \right]^{1/2} \quad (12)$$

Si se analiza la ecuación (12) se observa que cuando $\Omega=0$ el valor de $T = 1$. Cuando $\Omega=1$ $T=(1+4\beta^2)^{1/2} / 2\beta$. Cuando β es pequeño, $T \approx 1/2\beta$. Por otro lado cuando $T = 1$, $\Omega^2=2$, independientemente del valor de β , por lo tanto T es siempre menor que uno cuando $\Omega > \sqrt{2}$. Estas variaciones se resumen en la Tabla 1.

La variación de la transmisibilidad T para un vibrador de un grado de libertad, en función de la relación de frecuencias y para distintos valores de β , se observa en la Figura 5. Las unidades del parámetro transmisibilidad se realiza en «decibeles» ($decibeles = 20 \log_{10} T$), por lo tanto es habitual que la representación se realice en escala logarítmica para el eje de las abscisas (Kelly, 1993, 1996). En la Figura 5 puede observarse que el valor de T decrece para valores altos de Ω . Es decir que para valores elevados de Ω , el valor de T disminuye con la relación: $T \approx 2\beta / \Omega$, por lo tanto valores altos de amortiguamiento tienden a reducir la efectividad del sistema de aislamiento para altas frecuencias, sin embargo el amortiguamiento es esencial para limitar la respuesta en el intervalo de la resonancia ($\Omega = 1$).

Tabla 1. Valores límites de la función de transmisibilidad T para amortiguamiento viscoso.

Relación de frecuencias cuando tiende a...	Función de transmisibilidad (T) para amortiguamiento viscoso
$\Omega \rightarrow 0$	$T \rightarrow 1$
$\Omega \rightarrow 1$	$T \rightarrow \frac{\sqrt{1+4\beta^2}}{2\beta} \approx \frac{1}{2\beta}$
$\Omega \rightarrow \sqrt{2}$	$T \rightarrow 1$
$\Omega \rightarrow \infty$	$T \rightarrow \frac{2\beta}{\Omega}$

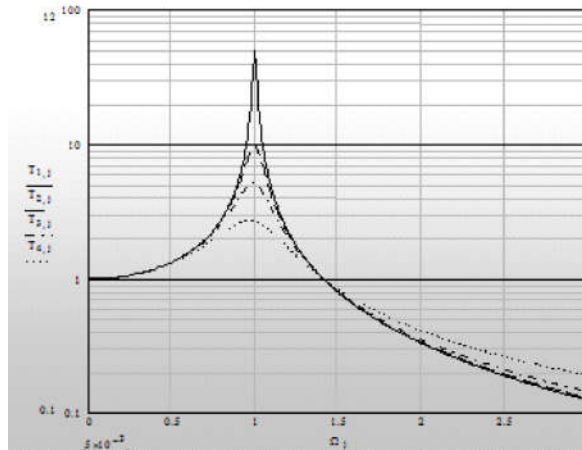


Figura. 5. Variación de la transmisibilidad T de un vibrador de un grado de libertad para amortiguamiento viscoso.

Un modelo de viscosidad lineal no sería adecuado para representar el comportamiento de ciertos tipos de aisladores (por ejemplo los elastoméricos) (Kelly, 1993, 1996), por lo que se hace necesario evaluar las funciones de transmisibilidad con amortiguamiento histerético. Las funciones de transmisibilidad, para ambos tipos de amortiguamiento, son muy parecidas en su forma, sin embargo presentan diferencias, respecto al amortiguamiento viscoso y para valores de Ω tendiendo a uno e infinito.

Para el caso particular de estructuras con aislamiento sísmico es conveniente utilizar procedimientos de cálculos no lineales (método paso a paso o historia de la respuesta en el dominio del tiempo) sin embargo para ciertos tipos de aisladores (elastoméricos), es posible, mediante una linealización de las ecuaciones de movimiento, plantear un sistema lineal equivalente (Kelly, 1991). Existen otros tipos de aisladores, por ejemplo los friccionales en los cuales es complejo linealizar las ecuaciones de movimiento aunque en algunos casos se han propuestos modelos no lineales de un grado de libertad (Bozzo et al, 1990).

La teoría lineal del aislamiento sísmico de dos grados de libertad, se basa en considerar dos masas, la m_s que representa la masa de la superestructura y la m_b que considera la masa de la estructura de fundación que se encuentra por encima del sistema de aislamiento incluido el mismo (Figura 6) (Naeim et al, 1999).

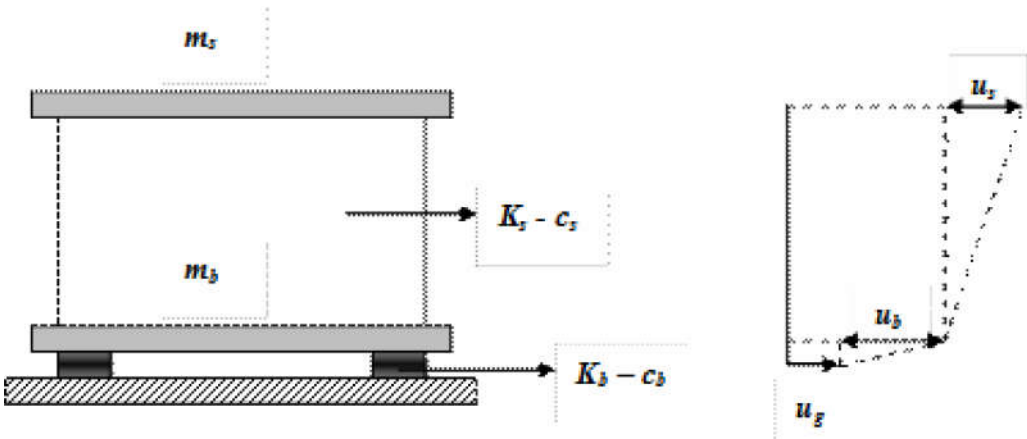


Figura 6. Modelo de 2 GDL para representar la estructura aislada.

En la figura precedente se representa con K_b y K_s , las rigideces del sistema de aislamiento y de la superestructura respectivamente, con c_b y c_s los coeficientes de amortiguamiento viscoso de los dos niveles considerados, u_g , el desplazamiento absoluto del terreno, u_b , el desplazamiento relativo del sistema de aislamiento con respecto al suelo y u_s , el desplazamiento relativo de la superestructura con respecto a la fundación.

Se define:

$$M_t = m_b + m_s \tag{13}$$

La ecuación del movimiento del modelo de dos grados de libertad se expresa como: (14)

$$\begin{aligned} (m_s + m_b) \ddot{u}_b + m_s \ddot{u}_s + c_b \dot{u}_b + k_b u_b &= -(m_s + m_b) \ddot{u}_g \\ m_s \ddot{u}_b + m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s &= -m_s \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (15)$$

Tratándose de un sistema de dos grados de libertad, es posible explicitar la ecuación (15) mediante una notación matricial (6), expresada sintéticamente mediante la (17):

$$\begin{bmatrix} M_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (16)$$

$$M_t \ddot{u} + C \dot{u} + K u = -M_t j \ddot{u}_g \quad (17)$$

En la última ecuación j es el vector que vincula el grado de libertad correspondiente al movimiento del suelo. La solución de la ecuación (17) está asociada a un problema de valores y vectores propios del tipo:

$$(K - \omega^2 M_t) \phi = 0 \quad (18)$$

En la ecuación (18) el valor de ω representa la frecuencia del sistema y j su correspondiente forma modal. La ecuación característica para la frecuencia puede explicitarse de la siguiente forma:

$$\omega^4 (1 - \gamma_m) - \omega^2 \left(\frac{K_b}{m_s + m_b} + \frac{K_s}{m_s} \right) + \frac{K_s}{m_s} \frac{K_b}{(m_b + m_s)} = 0 \quad (19)$$

El factor γ_m define la relación de masas:

$$\gamma_m = \frac{m_s}{(m_s + m_b)} = \frac{m_s}{M_t} \quad (20)$$

La solución de la ecuación (19) proporciona dos frecuencias naturales, asociadas a los dos grados de libertad del sistema. Si se define la frecuencia de la estructura y la del sistema de aislamiento, respectivamente como:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{K_s}{m_s}} \quad (21)$$

$$\omega_b = \sqrt{\frac{K_b}{m_b + m_s}} \quad (22)$$

La solución de la ecuación (19) resulta:

$$\omega_{1-2}^2 = \frac{\omega_b^2 + \omega_s^2}{2(1 + \gamma_m)} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4(1 - \gamma_m)}{(1 + \varepsilon)}} \right] \quad (23)$$

El coeficiente ε de la ecuación (23) representa la relación entre las frecuencias naturales.

$$\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} \quad (24)$$

Si se explicita las raíces de la ecuación (23), los valores de las frecuencias naturales pueden expresarse como:

$$\omega_1^2 \cong \omega_b^2(1 - \gamma_m \varepsilon) \quad \omega_2^2 \cong \frac{\omega_s^2}{(1 - \gamma_m)}(1 + \gamma_m \varepsilon) \quad (25)$$

La rigidez de estructura K_s , es muy alta comparada con la rigidez del sistema de aislamiento K_b , por lo tanto el factor ε tiene un valor pequeño. En general desde un punto de vista práctico es habitual tomar el valor ($\varepsilon = 0.01$) (Kelly, 1991). En consecuencia el cuadrado de dicho valor es muy próximo a cero, el término $(1 + \varepsilon)^2 \cong 1$ y la ecuación (25) queda reducida a las siguientes expresiones.

$$\omega_1^2 \cong \omega_b^2 \quad \omega_2^2 \cong \frac{\omega_s^2}{(1 - \gamma_m)} \quad (26)$$

El valor de ω_1 representa la frecuencia modificada del sistema de aislamiento y la ω_2 la frecuencia modificada de la estructura. De la observación de las anteriores ecuaciones se concluye que el período de una estructura con aislamiento sísmico es similar al período del sistema de aislamiento. Conocidos los valores propios de las frecuencias ω_1 y ω_2 , es posible expresar los vectores propios que permiten resolver el sistema lineal dado por la ecuación (18):

$$\phi_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ -\varepsilon \\ \gamma \end{bmatrix} \quad \phi_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ \gamma_m \end{bmatrix} \quad (27)$$

El vector propio correspondiente al primer modo de vibración indica que la totalidad del movimiento lateral de la estructura, se concentra en la base y el desplazamiento relativo entre los restantes pisos es una variable de segundo orden, por lo tanto, es posible considerar que el comportamiento estructural de edificios aislados sísmicamente es similar al de un sólido rígido con desplazamiento lateral concentrado en la base (Bozzo et al., 1990).

Si se utilizan los procedimientos clásicos de la dinámica estructural, los vectores propios (27), permiten desacoplar las ecuaciones del movimiento dadas por las expresiones (16 y 17). Dicho procedimiento conduce a los factores de amortiguamiento modal β y los de participación modal L :

$$\beta_1 = \beta_b (1 - 1.5 \gamma \varepsilon) \cong \beta_b$$

$$\beta_2 = \frac{\beta_s + \gamma \beta_b \varepsilon^{1/2}}{(1 - \gamma)^{1/2}} \left(1 - \frac{\gamma \varepsilon}{2} \right) \cong \frac{1}{(1 - \gamma)^{1/2}} (\beta_s + \gamma \beta_b \varepsilon^{1/2}) \quad (28)$$

$$L_1 = 1 - \gamma \varepsilon \cong 1 \quad L_2 = \gamma \varepsilon \quad (29)$$

Los factores de amortiguamiento de la estructura y del sistema de aislamiento incluidos en las ecuaciones (28) pueden expresarse como:

$$2 \omega_b \beta_b = \frac{c_b}{m_s + m_b} \Rightarrow \beta_b = \frac{c_b}{2 \omega_b (m_s + m_b)} \quad (30)$$

$$2 \omega_s \beta_s = \frac{c_s}{m_s} \Rightarrow \beta_s = \frac{c_s}{2 \omega_s m_s}$$

El valor de γ_m es siempre menor que la unidad y ε , como se citó anteriormente es aproximadamente 0.01, por lo tanto el factor de participación del segundo modo es mucho menor que el del primer modo. Esta situación permite controlar los desplazamientos relativos de piso para estructuras que eventualmente se encuentren vibrando en el segundo modo. Por otro lado, es posible que la excitación sísmica tenga un contenido de frecuencias con un periodo predominante similar al primer modo de la estructura, es decir que la respuesta puede no ser favorable debido a que su valor máximo está condicionado por el coeficiente de amortiguamiento del sistema de aislamiento β_b (Ecuación 30).

Para diseñar estructuras con aislamiento sísmico es importante tener presente el contenido de frecuencias de los terremotos del lugar donde se emplaza la estructura. Los espectros para suelos blandos presentan una tendencia a aumentar la ordenada espectral según se incrementa el periodo de la estructura, por lo tanto no es recomendable el empleo de aisladores elastoméricos en suelos blandos. La dependencia del contenido de frecuencias del terremoto no resulta tan marcada en otros tipos de aisladores, por ejemplo los friccionales (Bozzo et al., 2000). Los análisis de las respuestas de estructuras con aislamiento sísmico de base se realizan, muchas veces, en el ámbito de la no linealidad de las ecuaciones de movimiento y para ello se utilizan distintos procedimientos.

La extensión de la teoría lineal del aislamiento sísmico de dos grados de libertad, tratada en los puntos precedentes, a varios grados de libertad fue formulada por Kelly J. (1993) donde el modelo analítico es similar al de dos grados de libertad. Si se utilizan los mismos conceptos planteados en los puntos precedentes, el planteo matemático puede realizarse en forma matricial.

El amortiguamiento de los dispositivos de aislamiento y por ende del sistema de aislamiento tiene una importante incidencia en la respuesta de las estructuras aisladas. Investigaciones previas (Naeim et al., 1999; Tornello et al., 2008) indicaron que la cantidad de amortiguamiento del sistema de aislamiento en relación al amortiguamiento crítico depende de las características de los terremotos que puede esperarse en la zona de emplazamiento de la estructura aislada sísmicamente. Por otro lado valores altos de amortiguamiento del sistema de aislamiento puede anular los beneficios de la técnica del aislamiento.

3. Clasificación de los sistemas de control en la respuesta sísmica

Los sistemas de protección sísmica para estructuras utilizados en la actualidad, incluyen desde diseños relativamente simples hasta otros más avanzados, totalmente automatizados. Los sistemas de protección sísmica se pueden clasificar en tres categorías: Sistemas activos, sistemas semiactivos y sistemas pasivos.

3.1. Sistemas activos

Los sistemas activos de protección sísmica son complejos debido a que incluyen sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos, y actuadores dinámicos. La Figura 7 muestra el diagrama de flujo del mecanismo de operación de los sistemas de protección sísmica activos. Estos sistemas monitorean la respuesta sísmica de la estructura en tiempo real, detectando movimientos y aplicando las fuerzas necesarias para contrarrestar los efectos sísmicos.

El actuar de los sistemas activos se resume de la siguiente forma: las excitaciones externas y la respuesta de la estructura son medidas mediante sensores, principalmente acelerómetros, instalados en puntos estratégicos de la estructura. Un algoritmo de control procesa, también en tiempo real, la información obtenida por los instrumentos, y determina las fuerzas necesarias que deben aplicar los actuadores para estabilizar la estructura. Las fuerzas que estos sistemas utilizan son, generalmente, aplicadas por actuadores que actúan sobre determinadas masas.

Una de las principales desventajas de los sistemas activos de protección sísmica, además de su costo, es que necesitan de una fuente de alimentación externa continua para su funcionamiento durante un sismo. No obstante, constituyen la mejor alternativa de protección sísmica de estructuras, ya que permiten ir modificando la respuesta de los dispositivos en tiempo real, lo que implica un mejor comportamiento de la estructura durante el sismo.



Figura 7. Esquema del mecanismo de operación de los sistemas activos.

Los sistemas de protección sísmica activos han sido desarrollados fuertemente en Estados Unidos de Norteamérica y Japón. Son muy utilizados en Japón, donde las restricciones de espacio de las grandes urbes, han detonado la construcción de estructuras de gran esbeltez. La Figura 8 muestra esquemáticamente una estructura protegida con sistemas activos. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

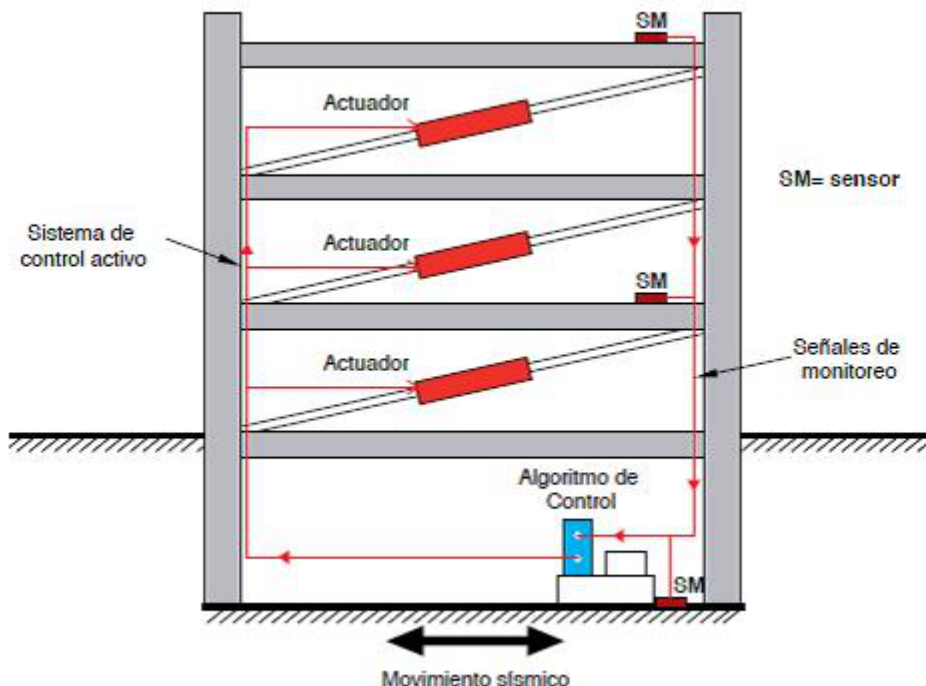


Figura 8. Esquema de estructura con sistema de control activo.

3.2. Sistemas semiactivos

Los sistemas semiactivos de protección sísmica, al igual que los activos, cuentan con un mecanismo de monitoreo en tiempo real de la respuesta estructural, sin embargo, a diferencia de los sistemas activos no aplican fuerzas de control directamente sobre la estructura. Los sistemas semiactivos actúan modificando, en tiempo real, las propiedades mecánicas de los dispositivos de disipación de energía. Ejemplos de estos sistemas son los amortiguadores de masa semiactivos, los dispositivos de fricción con fricción controlable, y los disipadores con fluidos electro o magneto-reológicos.

La Figura 9 muestra esquemáticamente una estructura protegida con sistema semi-activo. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

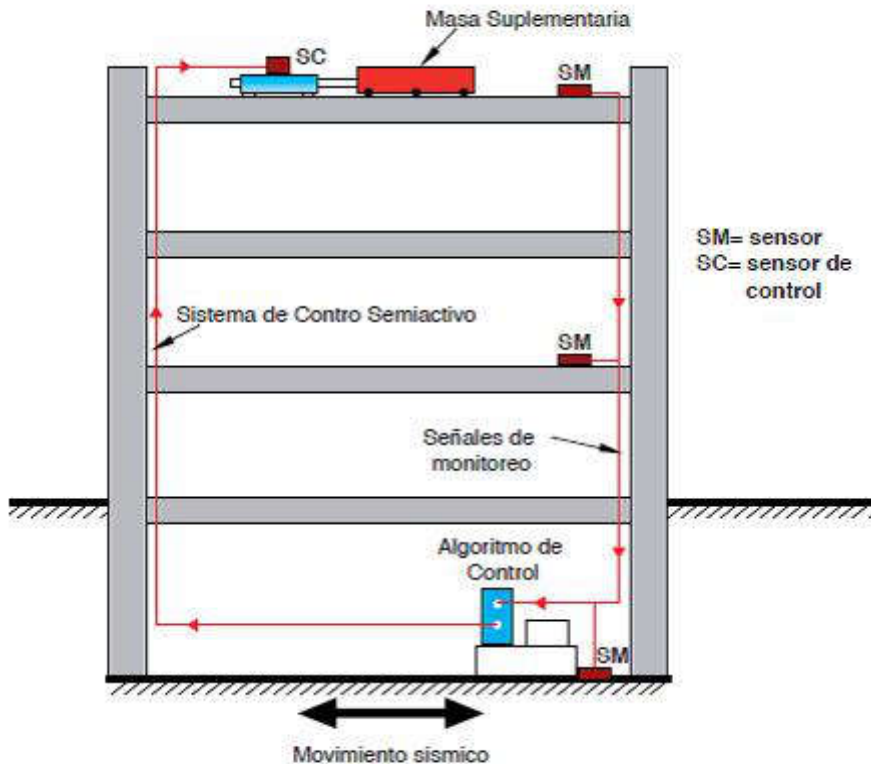


Figura 9. Esquema de estructura con sistema de control semiactivo.

3.3. Sistemas pasivos

Los sistemas pasivos son los dispositivos de protección sísmica más comúnmente utilizados en la actualidad. A esta categoría corresponden los sistemas de aislamiento sísmico de base y los disipadores de energía. Los sistemas pasivos permiten reducir la respuesta dinámica de las estructuras a través de dispositivos mecánicos especialmente diseñados para disipar energía. Dado que dichos dispositivos son más comúnmente utilizados, en comparación a los sistemas activos y semiactivos, es que serán tratados con mayor detalle en los próximos apartados del presente artículo.

La Figura 10 muestra el diagrama de flujo del mecanismo de operación de los sistemas de protección sísmica pasivos.



Figura 10. Esquema del mecanismo de operación de sistemas pasivos.

3.3.1. Disipación de energía

Los disipadores de energía, a diferencia de los aisladores sísmicos, no evitan que las fuerzas y movimientos sísmicos se transfieran desde el suelo a la estructura. Estos dispositivos son diseñados para disipar la energía entregada por terremotos, fenómenos de viento fuerte u otras sollicitaciones de origen dinámico, protegiendo y reduciendo los daños en elementos estructurales y no estructurales. Estos dispositivos permiten aumentar el nivel de amortiguamiento de la estructura.

En la Figura 11 se esquematiza el comportamiento de un edificio con y sin disipadores cuando es sometido a una acción vibratoria. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

Un caso particular de dispositivo de disipación de energía, corresponde a los amortiguadores de masa sintonizada. Estos dispositivos, ubicados en puntos estratégicos de las estructuras, permiten reducir la respuesta estructural.

En la Figura 12 se esquematiza el comportamiento de un edificio con y sin amortiguadores de masa sintonizada (AMS), sometido a una acción vibratoria. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

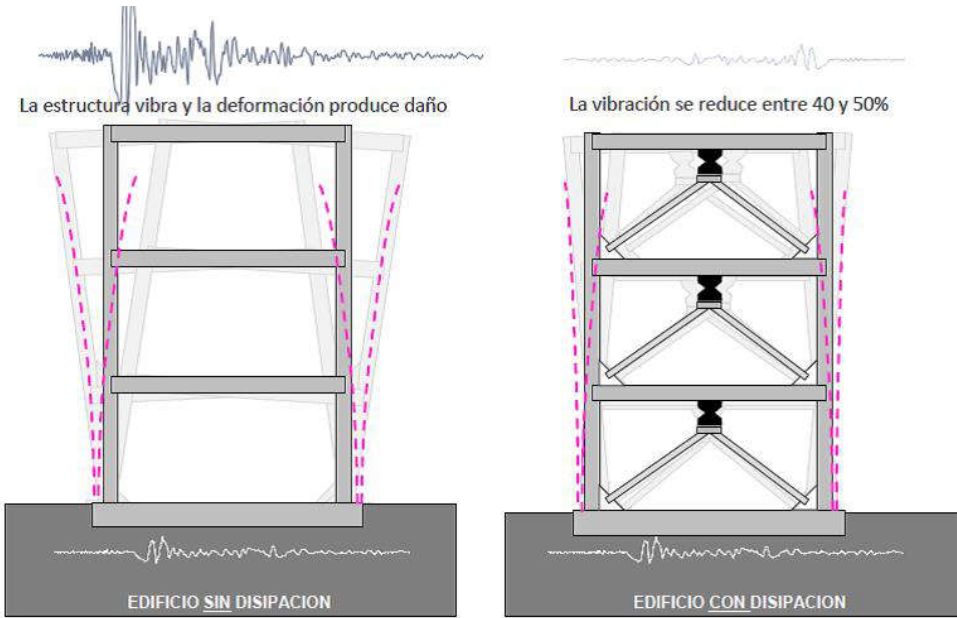


Figura 11. Esquema de edificio con y sin disipadores sometido a un movimiento sísmico

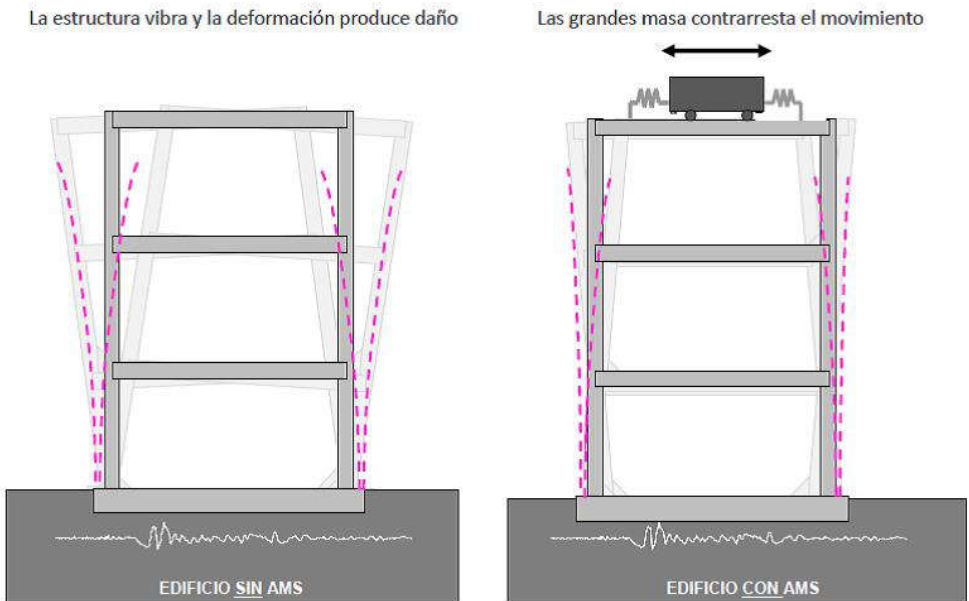


Figura 12. Esquema de edificio con y sin AMS sometido a un movimiento sísmico.

El diseño de estructuras con aislamiento sísmico se fundamenta en el principio de separar la superestructura de los movimientos del suelo o de la subestructura, a través de dispositivos flexibles en la dirección horizontal, generalmente ubicados entre la estructura y su fundación o a nivel del entrepiso del subsuelo (subestructura). Sin embargo, existen casos donde se han colocado aisladores en pisos superiores. La incorporación de aisladores sísmicos permite incrementar el periodo y el amortiguamiento de la estructura aislada.

En la Figura 13 se observa el comportamiento de un edificio con y sin aislamiento sísmico de base, sometido a un movimiento sísmico. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

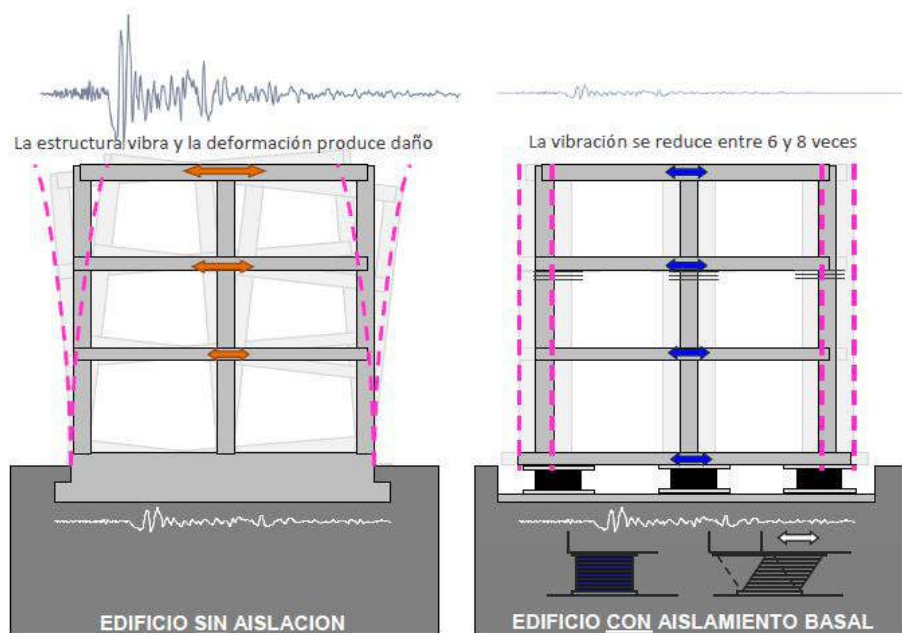


Figura 13. Esquema de edificio con y sin aislamiento sometido a un movimiento sísmico.

El aislamiento sísmico es utilizado para la protección de diversos tipos de estructuras, tanto nuevas como estructuras existentes que requieren un refuerzo estructural o bien una rehabilitación. Cabe aclarar que el uso sobre estructuras existentes no es muy común debido al costo y complejidad que ello implica, sin embargo hay casos en que efectivamente se han desarrollado con éxito (Corte de Apelaciones de San Francisco en los Estados Unidos, Naeim y Kelly, 1999). A diferencia de las técnicas convencionales de refuerzo estructural, el aislamiento sísmico busca reducir los esfuerzos a niveles que puedan ser resistidos por la estructura existente.

3.3.2. Dispositivos más frecuentemente utilizados en proyectos de aislamiento sísmico

El aislamiento sísmico de base es uno de los procedimientos más eficiente para la protección sísmica de estructuras relativamente bajas o rígidas. Los aisladores sísmicos más desarrollados y utilizados en la actualidad son los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (con o sin núcleo de plomo) y los deslizantes o friccionales sin embargo, en los últimos años se han desarrollado un número importante de dispositivos con el mismo objetivo. Los dispositivos más frecuentemente utilizados en los últimos años en las obras de ingeniería son los que se describen en los apartados siguientes:

A. Aisladores elastoméricos

Los aisladores elastoméricos son uno de los dispositivos más utilizados actualmente en el diseño de estructuras aisladas. Están conformados por un conjunto de láminas planas de elastómeros intercaladas con capas de acero.

Durante su construcción, las láminas de acero y goma se intercalan horizontalmente dentro de un molde de acero que da la forma geométrica al aislador, que por lo general, presentan una sección circular o cuadrada. Una vez colocadas estas láminas en el molde, se coloca el aislador bajo una prensa y se le aplica presión y temperatura de 140°C por un tiempo que dependerá de la sección del aislador. Durante este proceso la goma se vulcaniza y adquiere su propiedad elástica. Además, el calor aplicado produce la reacción del pegamento epóxico con que han sido cubiertas las láminas de goma y acero. La adherencia debe ser más resistente que la goma misma y la falla por cizalle de un aislador debe ocurrir por deformación en la goma antes que por una falla del pegamento goma-acero. El conjunto de láminas de goma y placas de acero está cubierto en sus extremos superior e inferior por dos placas de acero, en las cuales se conecta con la superestructura en su parte superior y la fundación en su parte inferior.

Mediante esta configuración se logra la flexibilidad lateral necesaria para permitir el desplazamiento horizontal relativo entre la estructura aislada y el suelo. El comportamiento de los aisladores elastoméricos depende de la amplitud de la deformación a la que son sometidos y, en menor grado, de la temperatura, el envejecimiento y la frecuencia del movimiento.

Existen varios tipos de dispositivos elastoméricos, entre ellos se encuentran los de goma natural (NRB, Natural Rubber Bearing), los de goma de bajo amortiguamiento (LDRB, Low-Damping Rubber Bearing) y alto amortiguamiento (HDRB, High-Damping Rubber Bearing), y los de goma con núcleo de plomo (LRB, Lead-plug Rubber Bearing).

A. 1) Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB)

Estos dispositivos son los más simples dentro de los aisladores elastoméricos. Los aisladores tipo LDRB presentan bajo amortiguamiento (2-5% como máximo), por lo que generalmente se utilizan en conjunto con disipadores de energía que proveen amortiguamiento adicional al sistema. Estos dispositivos presentan la ventaja de ser fáciles de fabricar. La respuesta de sistemas de aislamiento sísmico conformados por estos tipos de aisladores está influenciada por el valor del amortiguamiento y la rigidez equivalente del aislador (Kelly, 1993, 1996).

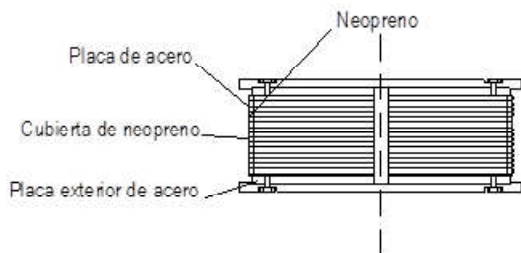


Figura 14. Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB).

A. 2. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

Los aisladores con núcleo de plomo (LRB) son aisladores elastoméricos similares a los LDRB pero poseen un núcleo de plomo, ubicado en el centro del aislador, que permite aumentar el nivel de amortiguamiento del sistema hasta niveles cercanos al 15%, lo que admite reducir los desplazamientos horizontales y mejorar la disipación de energía (Naeim et al., 1999). Al deformarse lateralmente el aislador durante la acción de un terremoto, el núcleo de plomo fluye, incurriendo en deformaciones plásticas, y disipando energía en forma de calor. Al término de la acción sísmica, la goma del aislador retorna la estructura a su posición original, mientras el núcleo de plomo recristaliza. De esta forma el sistema queda listo para un nuevo evento sísmico. La Figura 15 muestra los componentes de un aislador elastomérico tipo LRB.

Alejar el período fundamental de un edificio del período predominante de un terremoto no garantiza plenamente la protección de la estructura, debido a una posible resonancia con otras frecuencias naturales más altas (Bozzo et al., 2000). Por lo general diversos terremotos no muestran un período predominante claramente definido y es posible que la presencia de distintos picos espectrales conduzca a amplificaciones dinámicas. Para controlar dichas amplificaciones es oportuna la adición de amortiguamiento, parámetro que permite, de una manera más eficiente, la disipación de energía.

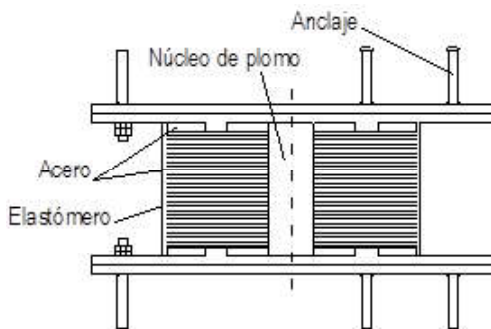


Figura 15. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).

La relación fuerza-desplazamiento puede modelarse mediante el modelo histerético indicado en la Figura 16.

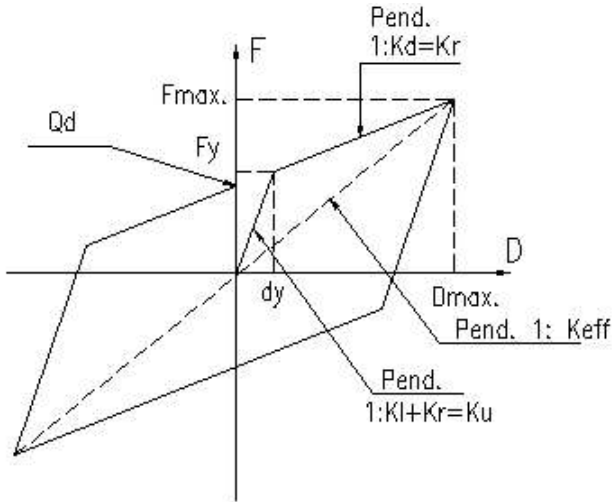


Figura 16. Constitutiva no lineal del aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB).

Los aisladores pueden ser identificados a través de distintos parámetros mecánicos, uno de ellos es la rigidez horizontal la cual puede estimarse con la siguiente expresión.

$$K_H = \frac{G A}{H_r} \tag{31}$$

Donde: G : módulo de corte transversal de la goma.
 A : área del aislador.
 H_r : altura total de goma.

El periodo del sistema aislado está en función de la rigidez lateral total del conjunto y puede estimarse con la expresión (32). La rigidez vertical del aislador puede determinarse con la ecuación (33).

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_H g}} \tag{32}$$

Donde: W : peso de la estructura.
 K_H : Rigidez horizontal total del sistema de aislamiento.

$$K_v = \frac{E_c A}{t_r} \quad (33)$$

Donde, E_c : módulo de elasticidad de la goma, modificado por un factor de forma del aislador (Kelly, 1993, 1996) y t_r : espesor de una capa de goma.

Con el valor de la rigidez vertical del aislador puede estimarse las tensiones normales (σ_c) y deformaciones (ε_c) del mismo las cuales deben ser inferiores a los límites fijados por los reglamentos de aplicación. Las tensiones en las placas de acero se verifican con la expresión siguiente:

$$\sigma_s = 2 \frac{t_r}{t_s} \sigma_c \quad (34)$$

Donde, t_s : espesor de la placa de acero.

Es necesario controlar la deformación debida a compresión, corte y flexión de tal manera que no supere los valores admisibles dados por los reglamentos de aplicación:

$$(\gamma_c)_o + (\gamma_s)_o + (\gamma_b)_o \leq f \varepsilon_u \quad (35)$$

Donde :

- $(\gamma_c)_o$: Distorsión angular máxima asociada a la compresión.
- $(\gamma_s)_o$: Distorsión angular máxima asociada al corte.
- $(\gamma_b)_o$: Distorsión angular máxima asociada a la flexión.
- $f = 1/3$ Para estado de servicio.
- $f = 1/2$ Para el terremoto de diseño.
- $f = 9/10$ Para el terremoto máximo esperado.

Para las deformaciones últimas se aceptan valores comprendidos entre 0.50 – 0.60. Para controlar la esbeltez del aislador se realizan dos comprobaciones. La primera es la verificación al vuelco del aislador que se efectúa a través de un desplazamiento lateral (Δ_{ro}):

$$\Delta_{ro} = \frac{P * D}{(2 K_H H) + P} \quad (36)$$

Donde:

- P : Carga normal sobre el aislador.
- D : Diámetro del aislador.
- H : Altura del aislador.

Los valores de (Δ_{ro}) deben ser inferiores a los límites fijados por los reglamentos de aplicación. La segunda verificación está relacionada con el pandeo del aislador que se realiza a través de una carga normal crítica (P_{cr}).

$$P_{cr} = \frac{R}{2} \left[\left(\sqrt{1 + 4 \frac{P_E}{R}} \right) - 1 \right] \quad (37)$$

Donde: R : Rigidez lateral unitaria del aislador.
 P_E : Carga euleriana del aislador

La ecuación 37 no contempla la reducción de la capacidad debido a las grandes deformaciones del aislador en compresión. Este efecto se considera mediante la reducción de la carga crítica y para ello se la multiplica por un factor que tiene en cuenta el área efectiva (A_{eff}) en compresión y el área total de la sección del aislador (A), ecuación 38.

$$P_{cr(eff)} = P_{cr} \frac{A_{eff}}{A} \quad (38)$$

La verificación queda satisfecha cuando la relación entre el ($P_{cr(eff)}$) y la carga normal N que actúa sobre el aislador es mayor que un coeficiente de seguridad definido por el reglamento de aplicación.

A. 3. Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)

Los HDRB son aisladores elastoméricos cuyas láminas de elastómeros son fabricados adicionando elementos como carbón, aceites y resinas, con el fin de aumentar el amortiguamiento de la goma hasta niveles cercanos al 10-15%. Los aisladores tipo HDRB presentan mayor sensibilidad a cambios de temperatura y frecuencia que los aisladores tipo LDRB y LRB. A su vez, los aisladores HDRB presentan una mayor rigidez para los primeros ciclos de carga, que generalmente se estabiliza luego del tercer ciclo de carga. Estos dispositivos, al igual que los dispositivos tipo LRB, combinan la flexibilidad y disipación de energía en un solo elemento, con la característica de ser, relativamente, de fácil fabricación.

El desarrollo de la goma con alto amortiguamiento fue obtenido en 1982 por *Malaysian Rubber Producers Research Association (MRPRA)* y dicha característica permite diseñar sistemas de aislamiento sin la adición de mecanismos que provean un amortiguamiento adicional. El amortiguamiento puede ser incrementado a valores comprendidos entre un 10 y un 15% con el 100% del esfuerzo de corte (Naeim et al., 1999).

El amortiguamiento que provee el aislador de goma de alto amortiguamiento no es viscoso ni tampoco histerético, su respuesta se encuentra entre ambos. Para un amortiguamiento viscoso lineal la disipación de energía es función del cuadrado del desplazamiento, mientras que para amortiguamiento histerético tiende a ser lineal con el desplazamiento.

B. Aisladores deslizantes

Los aisladores deslizantes o también llamados deslizadores friccionales utilizan una superficie de deslizamiento, típicamente de acero inoxidable, sobre la que desliza una placa de acero revestida de Politetra Fluoro Etileno (PTFE) más conocido como teflón, sobre la que se soporta la estructura. La superficie de deslizamiento permite el movimiento horizontal de la estructura de manera independiente del suelo. Este sistema de aislación sísmica permite disipar energía por medio de las fuerzas de rozamiento que se generan durante un terremoto. El coeficiente de fricción del aislador depende de variables tales como la temperatura de trabajo, la presión de contacto, la velocidad de movimiento, el estado de las superficies de contacto (limpieza, rugosidad, etc.) y el envejecimiento. Los aisladores deslizantes planos generalmente deben ser acompañados por mecanismos o sistemas restitutivos (típicamente aisladores elastoméricos con o sin núcleo de plomo) que restituyan la estructura a su posición original luego del terremoto. Adicionalmente, estos dispositivos requieren de mayor mantenimiento y cuidado, ya que cualquier modificación en las superficies deslizantes puede modificar los parámetros de diseño de los dispositivos.

La empresa *Earthquake Protection Systems (EPS)* fue quien patentó el aislador FPS. La misma le ha dado un gran impulso y se han instalado una importante cantidad de dispositivos a nivel mundial. El desarrollo tecnológico y el buen resultado obtenido con estos dispositivos han permitido contar actualmente con tres generaciones de aisladores friccionales. A los de primera generación se los conoce como de simple péndulo de fricción con una única superficie de deslizamiento, los de segunda cuentan con doble superficie de deslizamiento y a los de tercera generación, se los identifica como de triple péndulo de fricción con cuatro superficies de deslizamiento. Los aisladores friccionales poseen algunas ventajas y desventajas con relación a los aisladores elastoméricos.

Entre las principales ventajas pueden citarse: I) menores alturas; II) la separación entre el sistema de transmisión de carga vertical y el sistema de resistencia lateral (restitución); III) posibilidad de limitar el nivel de corte basal máximo de la estructura a un valor preciso; IV) simplicidad del mecanismo de disipación y bajo costo; V) los aisladores friccionales son más adecuados para estructuras livianas, VI) insensible al contenido de frecuencias del input; VII) se logra una frecuencia fundamental exacta; VIII) es independiente de la masa; XIX) Fuerza friccional proporcional al peso y eso minimiza los efectos de torsión (en el sistema de aislación, no en la superestructura).

Entre las desventajas se pueden mencionar: a) el control de las fuerzas normales en la interface de aislación; b) necesidad de proveer un mecanismo paralelo de restitución; c) mayor incertidumbre en la variación del coeficiente de fricción (μ), con el envejecimiento, abrasión y uso; d) incertidumbre en las propiedades de presión y velocidad; e) posibilidad de levantamiento.

Dentro de los aisladores friccionales existen distintos dispositivos, de los cuales los más importantes son:

B. 1. Aisladores friccionales

Los aisladores friccionales son los dispositivos más simples. Consisten básicamente en dos superficies, una adherida a la estructura y la otra a la fundación; poseen un bajo coeficiente de rozamiento, situación que permite los movimientos horizontales y también el hecho de

resistir las cargas verticales.

Por lo general, las superficies deslizantes son de acero inoxidable pulidas al espejo y de un material polimérico de baja fricción. A fin de prevenir deformaciones residuales luego de un evento sísmico, se debe proveer de sistemas restitutivos (típicamente aisladores elastoméricos o con núcleo de plomo) que restituyan la estructura a su posición original.

La Figura 17 muestra esquemáticamente un apoyo deslizante plano.

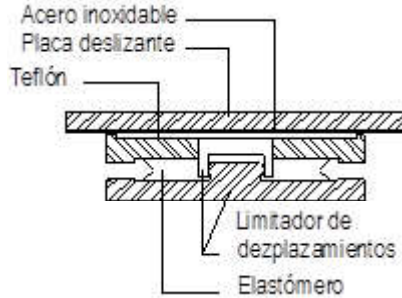


Figura 17. Esquema de un dispositivo aislador sísmico de base del tipo deslizante plano.

El comportamiento y la respuesta estructural de estos sistemas han sido estudiados por distintos autores (Constantinou et al., 1984, Bozzo et al., 1990, Tsopelas et al., 1994). El principio de los aisladores friccionales se basa en la ley de fricción de Coulomb dada por la ecuación (39).

$$F_f = \mu N_n \quad (39)$$

Donde:

N_n = Fuerza normal en la interfase de aislación.

$\mu = \tan(\varphi)$, coeficiente de fricción.

φ = Ángulo de roce medido entre la normal a la superficie y la dirección de la reacción sobre el cono de fricción.

En la interfase es necesario un material con una superficie muy pulida, para ello se utiliza el acero inoxidable. Por otro lado es necesario contar con un material de bajo coeficiente de fricción, entre ellos el teflón (polytetrafluoroetileno PTFE) presenta dicha propiedad debido a que se pueden lograr coeficientes entre $0.02 < \mu < 0.12$, valores menores que los que presentan otros materiales (De la Llera et al., 1998).

En la interfase teflón-acero, el coeficiente de fricción depende de la velocidad de deformación y de la presión de contacto. Dicho coeficiente aumenta con la velocidad y tiende a estabilizarse para valores de aproximadamente 10 cm/seg. (De la Llera et al., 1998)

Para estos dispositivos la disipación de energía se realiza a través del amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco (31), el cual es proporcional al coeficiente cinético de fricción, a la carga normal y a la amplitud del movimiento. El coeficiente de fricción es función de la naturaleza de la superficie de deslizamiento, velocidad relativa y de la presión de contacto, esto puede variar con el tiempo. Investigaciones realizadas sobre dicho coeficiente de fricción (Mokha et

al., 1988; Constantinou et al., 1990) concluyeron que la variación del coeficiente puede modelarse de acuerdo a la ecuación (40).

$$\mu_{(t)} = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \exp(-b_f |\dot{x}_b|) \quad (40)$$

Donde:

μ_{\max} = Coeficiente de fricción a velocidades altas.

μ_{\min} = Coeficiente de fricción a velocidades cercanas a cero.

b_f = Parámetro que controla la variación del coeficiente de fricción en función de la velocidad.

\dot{x}_b = Velocidad de deslizamiento.

Los dispositivos son fabricados con coeficientes de fricción que varían entre 0.10 y 0.30 y el mismo se representa como una función monótonamente creciente con la velocidad de deslizamiento (Bozzo et al., 2000).

B. 2. Péndulo Simple de friccionales (FPS, Friction Pendulum System)

El aislador de simple péndulo de fricción cuenta con un deslizador articulado ubicado sobre una superficie cóncava. Los FPS, a diferencia de los apoyos deslizantes planos, cuentan con la característica y ventaja de ser autocentrantes. Luego de un movimiento sísmico, la estructura regresa a su posición inicial gracias a la geometría de la superficie y a la fuerza inducida por la gravedad. En la Figura 18 se presenta el esquema de una aislador friccional de simple péndulo, al cual se le han asignado dimensiones geométricas para poder expresar las características geométricas de los mismos.

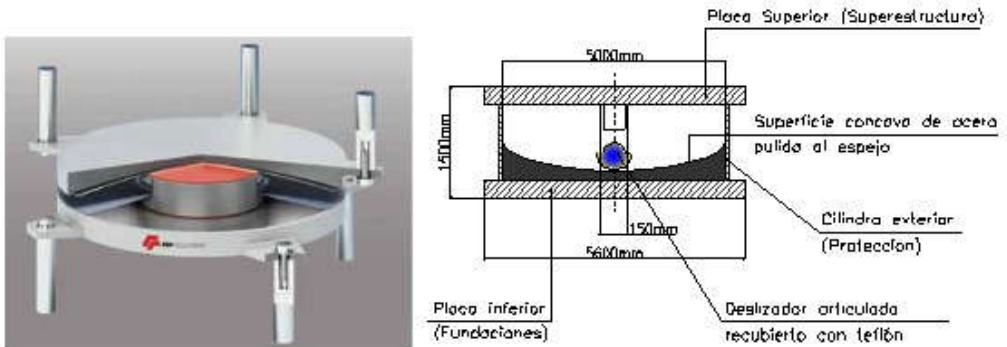


Figura 18. Esquema genérico y fotografía aislador friccional de simple péndulo (FPS).

El dispositivo emplea el peso propio de la estructura para recentrar el edificio, minimizando los desplazamientos finales permanentes (Mokha et al., 1990). Los materiales que se utilizan son los mismos que los del aislador anterior (acero inoxidable y PTFE), la superficie esférica es de acero inoxidable y el patín de teflón de alta resistencia. Este último se articula de manera que se adapte adecuadamente a la superficie esférica una vez desplazado.

Condiciones de equilibrio indican que la fuerza (F) actuando sobre el patín cuando el mismo se desliza puede ser determinada por la ecuación (41) (De la Llera et al., 1998).

$$F = \left(\frac{W}{R_e} \right) \delta + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{\delta}) \quad (41)$$

Donde: W = Fuerza normal sobre el patín del aislador.

R_e = Radio de la superficie esférica.

m = Coeficiente de fricción.

d = Desplazamiento del patín del aislador.

El período secante del aislador pendular friccional se aproxima al período de un péndulo de radio R_e , oscilando en torno a un punto fijo.

$$T_{\text{sec}} = 2\pi \sqrt{\frac{R_e \delta o}{g(\delta o + \mu R_e)}} \rightarrow \left(2\pi \sqrt{\frac{R_e}{g}} \right)_{\delta o \rightarrow \infty} \quad (42)$$

Donde: δo = Deformación máxima.

Por lo tanto si se dan valores a R_e es posible determinar en forma simple valores del periodo secante del aislador. Las ecuaciones propuestas son suficientes a los fines prácticos de diseño de los aisladores. El aislador de péndulo de fricción tiene una ley constitutiva con valores de rigideces estables en los distintos pasos histeréticos. En la Figura (19), se muestran los resultados de un ensayo realizado sobre un aislador pendular friccional (De la Llera et al., 1998).

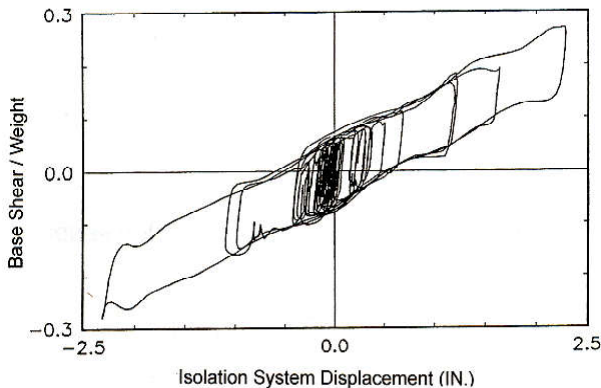


Figura 19. Ensayo de un aislador pendular friccional realizado en mesa vibradora.

Por lo tanto la ley constitutiva que se utiliza para modelar el aislador friccional de simple péndulo es la que muestra la Figura 20.

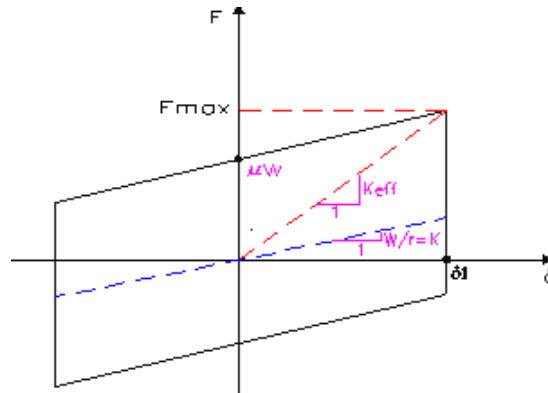


Figura 20. Constitutiva de un aislador friccional de simple péndulo.

Debido al movimiento aleatorio de un terremoto, el deslizador se mueve sobre la superficie cóncava en las dos direcciones siguiendo también movimientos aleatorios, sin embargo el planteo matemático del problema puede realizarse descomponiendo el movimiento en las direcciones principales. En rigor, el deslizador no se desplaza sobre una línea cóncava sino sobre una superficie que tiene la forma de un casquete esférico invertido (Figura 21).

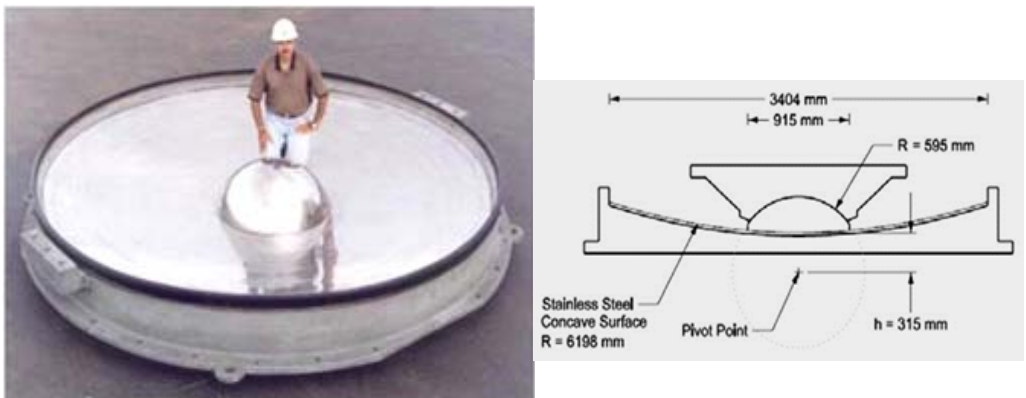


Figura 21. Deslizador y superficie cóncava de deslizamiento.

A. 4. Aisladores de triple péndulo de fricción (FP)

El aislador de triple péndulo de fricción posee, en relación al de simple péndulo de fricción, importantes diferencias con relación a la rigidez, amortiguamiento y amplitud de desplazamientos. La constitutiva de fuerza versus desplazamientos es compleja y muestra distintos puntos de transición que dependen de las propiedades geométricas y friccionales de los aisladores. En la Figura 22 se muestra la geometría de un aislador de triple péndulo de fricción (FP). (Fenz et al., 2008).

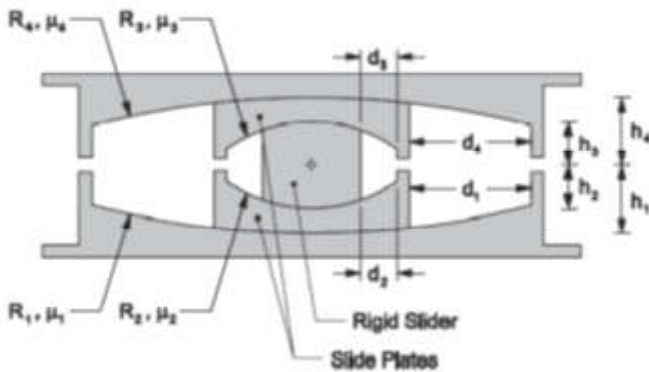


Figura 22. Geometría y características generales de un aislador de triple péndulo de fricción.

La respuesta de los aisladores de triple péndulo de fricción es función de los siguientes parámetros: radios R_1, R_2, R_3 y R_4 (normalmente $R_1=R_4$ y $R_2=R_3$); alturas h_1, h_2, h_3 y h_4 (normalmente $h_1=h_4$ y $h_2=h_3$); distancias que definen la capacidad de desplazamientos d_1, d_2, d_3 y d_4 (normalmente $d_2=d_3$ y $d_1=d_4$) y de los coeficientes de fricción m_1, m_2, m_3 y m_4 (normalmente $m_2 = m_3$). La capacidad de desplazamiento en cada interfase de deslizamiento puede determinarse con la expresión siguiente:

$$d_i^* = \frac{R_{eff\ i}}{R_i} d_i; \quad i = 1 \dots 4 \quad (43)$$

Donde $R_{eff\ i}$, es el radio efectivo para la superficie «i», el cual se puede determinar con la expresión siguiente:

$$R_{eff\ i} = R_i - h_i \quad i = 1 \dots 4 \quad (44)$$

La relación fuerza lateral versus desplazamientos del aislador de triple péndulo de fricción se muestra en la Figura 23. Ella muestra cinco ciclos («loops») diferentes que definen, a su vez, cinco regímenes de desplazamientos diferentes. Los aisladores de triple péndulo de fricción son normalmente diseñados para trabajar entre el régimen I y IV. El régimen V, se reserva como parámetro para restringir el desplazamiento del dispositivo. En régimen V el dispositivo consu-

me la capacidad de desplazamiento d_1 y d_4 , deslizándose solo las superficies 2 y 3 (Figura 22). (Fenz et al., 2008).

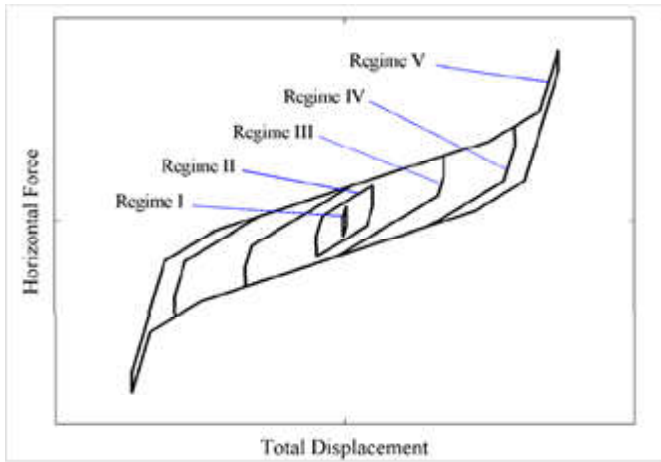


Figura 23. Relación Fuerza lateral versus desplazamientos de un aislador de triple péndulo de fricción.

La constitutiva, fuerza versus desplazamiento, del aislador de triple péndulo de fricción se muestra en la Figura 24. La misma representa el caso particular que citan el grupo de igualdades (45). (Fenz et al., 2008).

$$R_{eff1} = R_{eff4} ; R_{eff2} = R_{eff3} ; d_1^* = d_4^* ; d_2^* = d_3^* ; \mu_1 = \mu_4 ; \mu_2 = \mu_3 \quad (45)$$

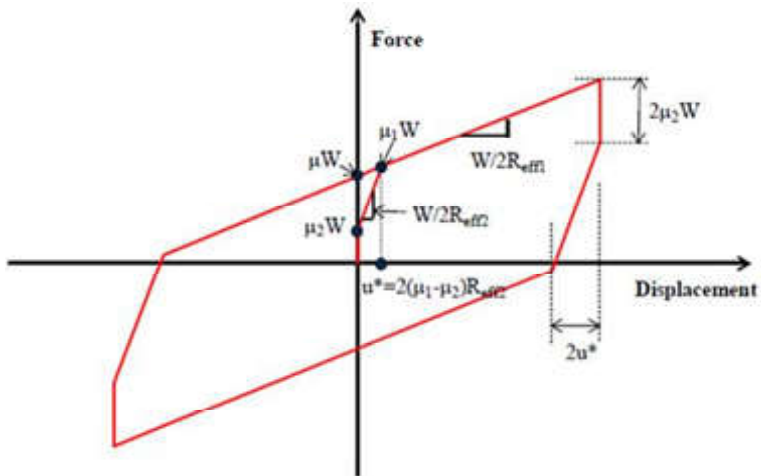


Figura 24. Relación Fuerza-Desplazamiento del aislador de triple péndulo de fricción.

La relación Fuerza-Desplazamiento que describe la Figura 24 puede determinarse con la expresión siguiente:

$$F = \frac{W}{2R_{eff1}}u + \left[\mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}} \right] W \quad (46)$$

La relación dada por la ecuación (38) es válida hasta que la fuerza lateral y el desplazamiento alcanzan los valores dados por las ecuaciones siguientes:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}}d_1^* + F_{f1} \quad (47)$$

$$u = u^* + 2d_1^* = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + 2d_1^* \quad (48)$$

$$u^* = u^{**} = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} \quad (49)$$

La fuerza para desplazamiento cero se determina con la expresión (42):

$$\mu W = \left[\mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}} \right] W \quad (50)$$

C. Sistemas de resortes metálicos helicoidales y amortiguadores viscosos

Estos dispositivos fueron originalmente desarrollados para aplicarse en máquinas de pequeño porte, luego se extendió a fundaciones de máquinas pesadas e instalaciones industriales de importancia, como 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 sistemas cuando las estructuras se encuentran sujetas a la acción de los terremotos. Un claro ejemplo es el edificio de la Residencia Universitaria de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, el cual fue construido con este sistema de aislamiento. Desde su inauguración ha sido permanentemente monitoreado y su comportamiento frente acciones sísmicas ha sido exitoso. (Tornello et al., 2003, 2004, 2005).

Posee la ventaja de que el comportamiento es conocido y controlado, es adecuado a las altas temperaturas (por lo tanto para su fabricación se utilizan determinadas aleaciones), no presenta fluencia ni tampoco desplazamiento residuales.

Comparativamente con otros sistemas es de menor costo, presenta la desventaja de que el resorte solo, posee bajo amortiguamiento (cerca del 2%) por lo tanto es necesario utilizarlo con otros dispositivos que permitan aumentar dichos valores. 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 viable de fabricación, es baja.

Los aisladores elastoméricos o friccionales, en sus distintos modelos, son habitualmente

utilizados para suministrar aislamiento horizontal. Los sistemas basados en resortes metálicos han sido utilizados en viviendas para proveer aislamiento en las tres direcciones (Naeim et al., 1999).

Los dispositivos GCS (GERB Control System®, quien posee las patentes de los dispositivos) fueron originalmente diseñados, para controlar las vibraciones que generaban las turbinas en plantas hidroeléctricas. El sistema está conformado por paquetes de resortes con baja rigidez en sentido horizontal y vertical. Para aumentar el amortiguamiento del sistema de aislamiento se instalan junto con amortiguadores viscosos (Visco® - Figura 25)

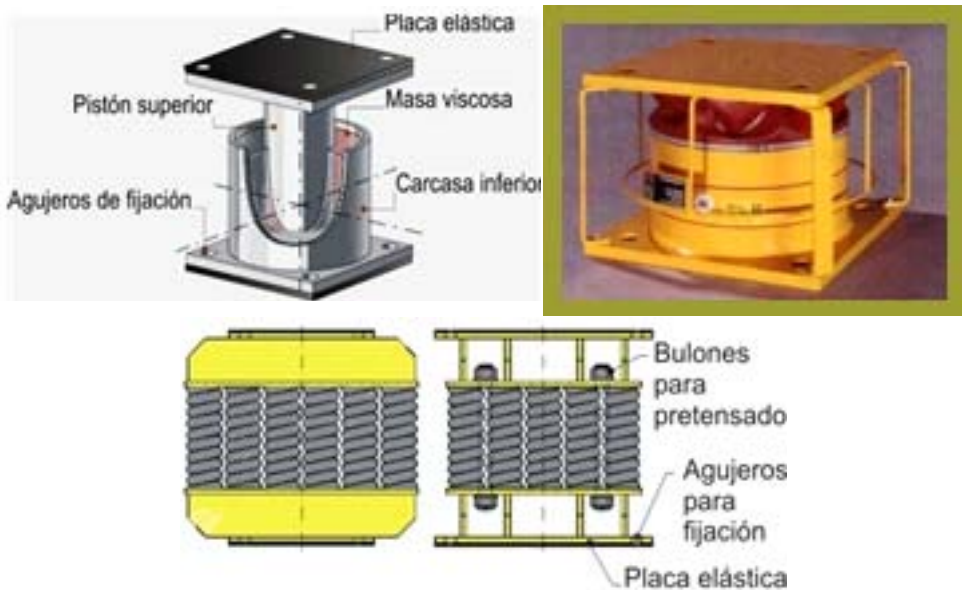


Figura 25. Paquete de resortes metálicos GERB y Amortiguadores viscoelásticos GERB (Visco®).

El amortiguador viscoso (Figura 25) está compuesto por una carcasa inferior que contiene una masa viscosa. El pistón de la carcasa superior penetra en una masa viscosa y genera una fuerza, también viscosa, en las tres direcciones ortogonales. Un manguito de protección cierra herméticamente ambas carcasas para evitar que ingresen elementos extraños de tal manera de impedir la contaminación de la masa viscosa.

El sistema presenta un fuerte acoplamiento entre el movimiento horizontal y el pendular debido a que el centro de gravedad de la estructura aislada se encuentra por encima del centro de rigidez del mismo (Figura 26), por lo tanto el sistema es práctico en situaciones donde el centro de gravedad y el centro de rigidez se encuentran en el mismo nivel (caso que se presenta con mucha frecuencia en el reactor de una planta nuclear (Farzad et al., 1999).

La rigidez vertical del resorte puede evaluarse con la ecuación (51) mientras que la lateral se encuentra influenciada por un efecto combinado de la flexión y torsión y puede ser evaluado con la ecuación (52).

$$k_v = \frac{G d_e^4}{8 n_e D^3} \quad (51)$$

$$k_l = \frac{1.13 * 10^6 d_e^4}{n_e D (0.204 h_s^2 + 0.256 D^2)} [N * m] \quad (52)$$

Donde: G = Módulo de corte del material del resorte.
 d_e = Diámetro de la espira que conforma el resorte.
 n_e = Número de espiras activas.
 h_s = Altura libre del resorte.

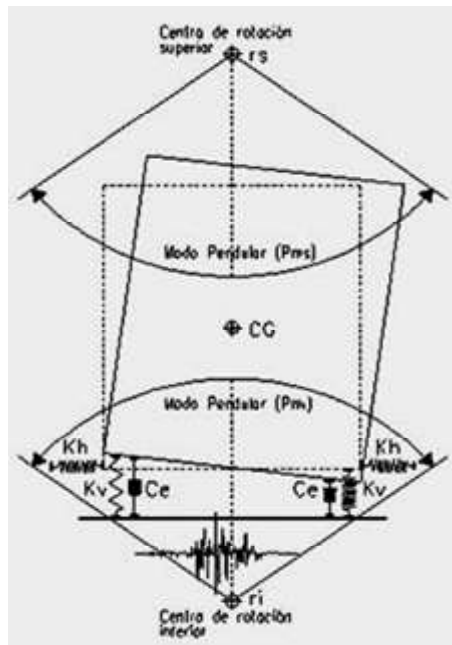


Figura 26. Esquema general de los polos de rotación del sistema de aislamiento GERB para los modos pendulares

El sistema (aisladores de resortes helicoidales más amortiguador viscoso) instalado en la Residencia de Estudiantes de la Facultad Regional Mendoza de la UTN, presentan como característica una rigidez lineal, tanto horizontal como vertical y un amortiguamiento cuyo comportamiento se aproxima al lineal viscoso (Figura 27) sin embargo en otros casos la variación es no lineal con la velocidad situación que puede ser beneficiosa cuando los niveles de aceleración del terremoto son elevadas.

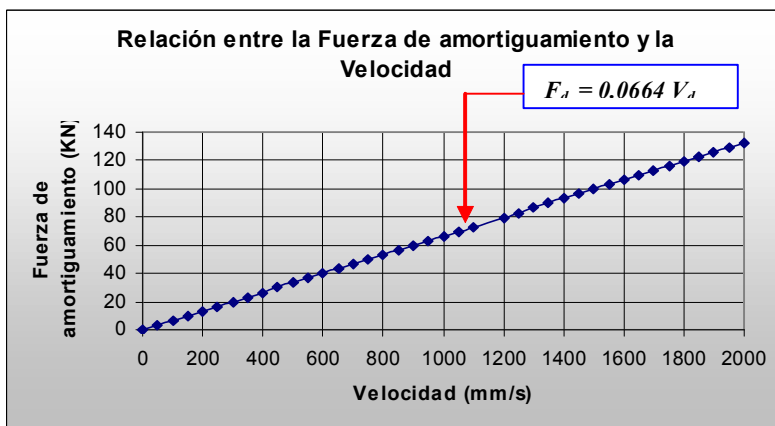


Figura 27. Relación lineal entre la fuerza de amortiguamiento y la velocidad.

C. 1. Marco teórico para evaluar las respuestas de estructuras aisladas con dispositivos GCS

Inicialmente y con el objeto de evaluar respuestas de estructuras aisladas con dispositivos GCS, puede utilizarse un modelo simplificado que permite determinar las respuestas en el tiempo cuando actúan las tres componentes sísmicas del terremoto (Aguiar y Tornello, 2009). El modelo considera que la superestructura se desplaza como cuerpo rígido ante la acción de un sismo sin embargo, debido a la presencia de los resortes, los desplazamientos verticales en los extremos del edificio serán de signos contrarios debido al efecto pendular de la respuesta (Tornello y Sarrazin, 2007). Es decir, mientras un extremo de la estructura aislada asciende, el otro desciende, la diferencia de desplazamientos verticales pone de manifiesto el mecanismo de disipación de energía.

Para el análisis de la respuesta sísmica el método numérico considera concentrada la masa en la posición donde se emplazan los resortes helicoidales de acero y el amortiguador viscoso. En cada masa del sistema de aislamiento se consideran tres grados de libertad, dos desplazamientos horizontales y un desplazamiento vertical, como se muestra en la Figura 28. El problema corresponde a una estructura con cuatro dispositivos de control pasivo nótese, por lo tanto, que primero se han enumerado los grados de libertad correspondientes a los desplazamientos horizontales en sentido «X», luego los desplazamientos horizontales en sentido «Y» y finalmente los grados de libertad verticales. Cada dispositivo de control tiene tres rigideces según las direcciones X, Y, Z; como se aprecia a la izquierda de la Figura 29 y tiene tres factores de amortiguamiento (amortiguador viscoso) dos en sentido horizontal y uno en sentido vertical como se observa a la derecha de la Figura 18.

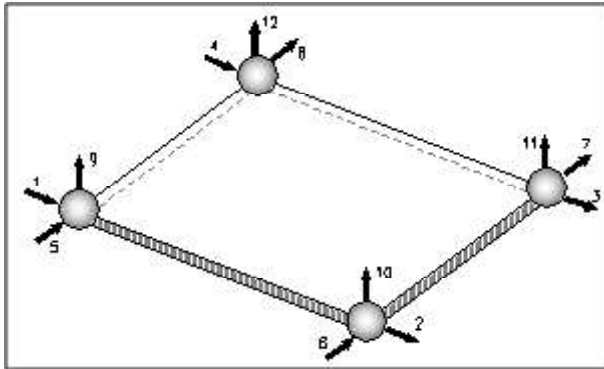


Figura 28. Grados de libertad del sistema de aislamiento

Las matrices de rigidez $K^{(b)}$, y de masa $M^{(b)}$, del modelo propuesto quedan definidas a través de las matrices 53 y 54.

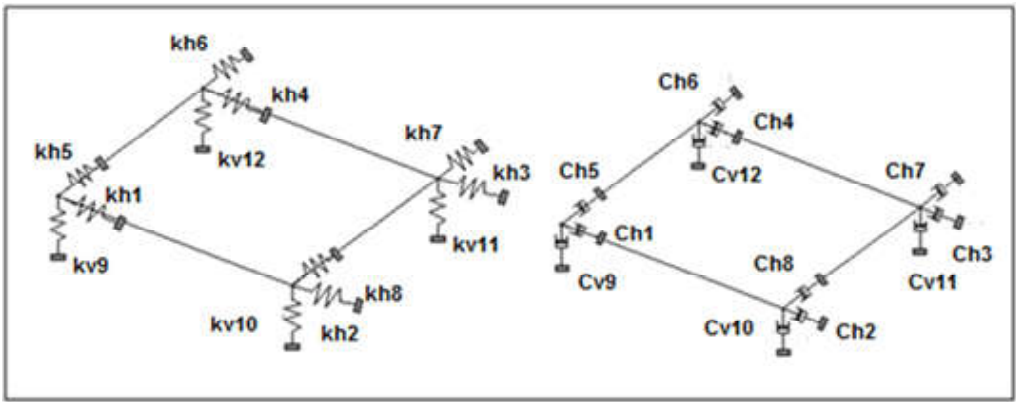


Figura 29. Rigidez y amortiguamiento en la posición de los dispositivos GCS

$$K^{(b)} = \begin{bmatrix} k_{hx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{hy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{vz} \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$M^{(b)} = \begin{bmatrix} m^{(t)} & 0 & 0 \\ 0 & m^{(t)} & 0 \\ 0 & 0 & m^{(t)} \end{bmatrix} \quad (54)$$

Donde k_{hx} , k_{hy} , k_{yz} son submatrices diagonales, cuyos elementos son las rigideces de los aisladores de resortes en sentido; horizontal (x), horizontal (y), y vertical (z), respectivamente. En la expresión 54, $m^{(t)}$ es una submatriz diagonal, compuesta por cada una de las masas discretas. (Aguilar, 2007).

Con relación al modelo de la Figura 29 y en concordancia con un sistema de aislamiento compuesto por cuatro resortes de acero y cuatro amortiguadores viscosos, k_{hx} es una submatriz diagonal de cuatro por cuatro, cuyos términos de la diagonal son, k_{h1} , k_{h2} , k_{h3} , k_{h4} . Los elementos asociados a la k_{hy} son k_{h5} , k_{h6} , k_{h7} , k_{h8} y los correspondientes a K_{vz} son k_{v9} , k_{v10} , k_{v11} , k_{v12} .

Por otro lado, los elementos de la diagonal de la submatriz $m^{(t)}$ son, m_p , m_2 , m_3 , m_4 . Las masas discretas m_i se obtienen en función del peso total de la superestructura, de la losa por encima de los dispositivos de aislamiento y el peso propio de cada dispositivo de aislamiento.

$$C^{(b)} = M^{(b)} \Phi \hat{C}^{(b)} \Phi^t M^{(b)} \quad (55)$$

La matriz de amortiguamiento $C^{(b)}$ se obtiene en función de la matriz de masas $M^{(b)}$ de los modos de vibración, de la matriz modal y del amortiguamiento del dispositivo viscoso (Expresión 55).

Donde $\hat{C}^{(b)}$ es una matriz diagonal compuesta por las submatrices que definen el amortiguamiento del dispositivo viscoso (Expresión 56).

$$\hat{C}^{(b)} = \begin{bmatrix} \hat{C}_{hx} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{C}_{hy} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{C}_{vz} \end{bmatrix} \quad (56)$$

Para el modelo de la Figura 29, los elementos de la diagonal de \hat{C}_{hx} son C_{h1} , C_{h2} , C_{h3} , C_{h4} . En función del factor de amortiguamiento en sentido horizontal x_h , se definen los elementos de la diagonal de \hat{C}_{hx} con $2\xi_{hi} \omega_i m_i$ para «i» de 1 a 4. Siendo ξ_{hi} el factor de amortiguamiento en sentido (x) asociado al primer modo de vibración; m_i es la masa discreta *i*; ω_i es la frecuencia de vibración para el modo *i*; los valores de las submatrices \hat{C}_{hy} , \hat{C}_{vz} resultan en todos sus términos similares a los precedentes, es decir, el subíndice *i*, es el modo de vibración para el caso de la frecuencia natural ω_y para el factor de amortiguamiento ξ . El subíndice *i*, también indica la masa discreta.

Para la dirección (y) se trabaja con el factor de amortiguamiento en sentido (y). Para la dirección Z, con el correspondiente factor de amortiguamiento vertical. Cada amortiguador viscoso tiene tres factores de amortiguamiento, dos en sentido horizontal y uno en sentido vertical. El modelo presentado considera que la superestructura se mueve como cuerpo rígido y la respuesta de la misma se determina resolviendo la ecuación 57.

$$M^{(b)} \ddot{q}^{(b)} + C^{(b)} \dot{q}^{(b)} + K^{(b)} q^{(b)} = -M^{(b)} J \ddot{U}_g \quad (57)$$

Donde $q^{(b)}$, $\dot{q}^{(b)}$, $\ddot{q}^{(b)}$ son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración del sistema de aislamiento. Se hace notar que, primero se enumeran todas las coordenadas en sentido (x), luego en sentido (y), y finalmente en (z) (Figura 29). En estas condiciones y cuando solo actúa sismo en sentido (x), el vector $J' = [1 \ 0 \ 0]$; para sismo en sentido (y) el vector y para sismo en sentido (z), $J' = [0 \ 0 \ 1]$. Donde I es el vector unitario y θ , un vector compuesto por ceros. El orden de estos vectores I y θ es igual al número de masas discretas. Con esta consideración la aceleración del suelo \ddot{U}_g puede ser \ddot{U}_{gx} para sismo en sentido (x) \ddot{U}_{gy} ; para sismo en sentido (y); \ddot{U}_{gz} para sismo en sentido (z).

C.2. Respuestas en la superestructura aislada con dispositivos GCS

Se plantea un modelo matemático para un edificio de planta rectangular y de tres niveles. El modelo matemático de análisis admite que las losas de la superestructura son rígidas en el plano horizontal razón por la cual se considera un grado de libertad vertical en cada uno de los nudos de la superestructura. Por otra parte, en función de la hipótesis asumida, se puede admitir que el piso experimenta el mismo desplazamiento horizontal (Aguar y Tornello, 2009). En la Figura 19 se indican los grados de libertad considerados; nótese que, primero se enumeran los desplazamientos horizontales de piso y posteriormente los desplazamientos verticales.

La estructura que se plantea como ejemplo tiene 27 grados de libertad (desplazamientos), 3 en sentido horizontal (x) y 24 en sentido vertical. Los desplazamientos se agrupan en un vector u . El algoritmo permite el análisis sísmico de la estructura ante la acción de dos componentes horizontales y una vertical. Se define al vector transpuesto $u' = [u_x \ u_z]$ donde u_x es el vector que contiene a los desplazamientos de piso en sentido horizontal; u_z el vector que contiene a los desplazamientos de cada nudo en sentido vertical.

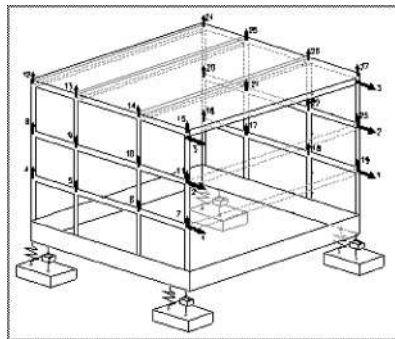


Figura 30. Grados de libertad considerados en la superestructura

Para los dispositivos GCS se han considerado tres grados de libertad en cada dispositivo de control (Figura 31). Debido a que la estructura se plantea con cuatro dispositivos GCS, uno en cada vértice del edificio, se tendrán 12 grados de libertad los cuales se los agrupa en un vector q . El vector transpuesto se define como q^T . Donde q_x es un vector compuesto por los desplazamientos en sentido (x), q_y , q_z , vectores formados por los desplazamientos de los dispositivos GCS en sentido (y), (z), respectivamente.

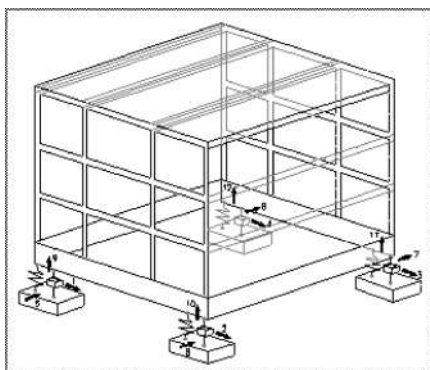


Figura 31. Grados de libertad de los dispositivos GCS

Las masas discretizadas de la superestructura se ubican en cada nudo de la misma (Figura 32). La numeración de las masas está en concordancia con la numeración de los grados de libertad mostrados en la Figura 30. Primero se enumeran las masas de todo un plano vertical desde el primer piso hasta el último piso y luego se continúa con el siguiente elemento. En la Figura 33 se indica la discretización de las masas del sistema de aislamiento. Cada una de estas masas se obtiene tomando en cuenta el peso de la losa ubicada por encima de los dispositivos de aislamiento y de los propios dispositivos de control GCS.

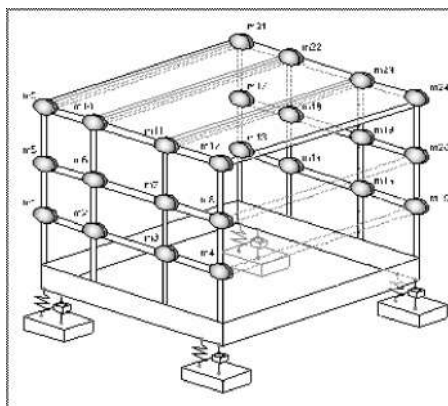


Figura 32. Discretización de las masas en la superestructura.

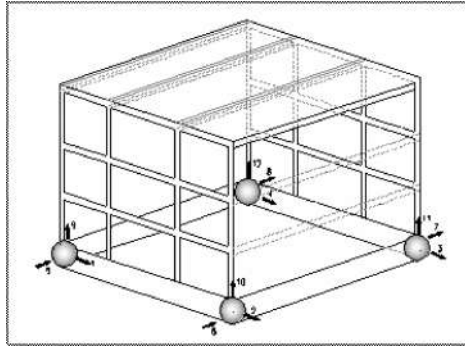


Figura 33. Discretización de las masas a nivel de dispositivos de aislamiento GCS

C. 3. Matrices de la superestructura

La matriz de rigidez $K^{(s)}$ de la superestructura se obtiene a partir de la matriz de rigidez lateral-vertical, K_{L-V} de cada uno de los planos verticales. Bajo la hipótesis de diafragma rígido se tendrá un desplazamiento horizontal por piso y dos grados de libertad en cada nudo, el desplazamiento vertical y la rotación.

Se determina la matriz de rigidez completa del plano vertical analizado con los grados de libertad indicados y luego se condensa para tener solo desplazamientos horizontales de piso y desplazamientos verticales en cada nudo. A dicha matriz se la conoce como matriz de rigidez lateral-vertical K_{L-V} (Aguiar *et al* 2008). Finalmente se determina la matriz de rigidez de la superestructura $K^{(s)}$ por ensamblaje directo.

La matriz de masas $M^{(s)}$ de la superestructura se halla evaluando la energía cinética de la estructura (Aguiar R., 2007). Para el modelo numérico que se analiza, la forma de la matriz diagonal $M^{(s)}$ es la indicada en la expresión (58)

$$M^{(s)} = \begin{bmatrix} m^{(st)} & \\ & m^{(sp)} \end{bmatrix} \quad (58)$$

Donde $m^{(st)}$ es una matriz diagonal compuesta por la masa total del piso 1, la masa total del piso 2, la masa total del piso n, $m^{(sp)}$, es una matriz diagonal compuesta por cada una de las masas discretas de la superestructura, desde la primera masa concentrada hasta la última masa considerada en el modelo. Encontradas las matrices de masa $M^{(s)}$ y de rigidez $K^{(s)}$ se determina la matriz modal $\Phi^{(s)}$ de la superestructura y se encuentra la matriz de amortiguamiento $C^{(s)}$ de la subestructura con la ecuación 59.

$$C^{(s)} = M^{(s)} \Phi^{(s)} \hat{C}^{(s)} \Phi^{(s)t} M^{(s)} \quad (59)$$

C.4. Matrices del sistema de aislamiento

Debido a las características de los aisladores de resortes, cada dispositivo de control posee tres rigideces según las direcciones (x), (y), (z). En correspondencia y debido a la particularidad de funcionamiento de los amortiguadores viscosos (Makris *et al*, 1991), cada dispositivo tendrá

tres factores de amortiguamiento, dos en sentido horizontal y uno en sentido vertical. El modelo ha sido indicado en la Figura 32.

La matriz de rigidez, $K^{(b)}$ y de masa $M^{(b)}$, se determinan con las expresiones (53) y (54). La matriz de amortiguamiento $C^{(b)}$ se evalúa con la expresión (55) y la matriz diagonal $\hat{C}^{(b)}$ que definen el amortiguamiento del amortiguador viscoso con la expresión (56).

C.5. Sistemas de ecuaciones diferenciales

El sistema de ecuaciones diferenciales tanto para los dispositivos de aislamiento como para la superestructura se expresan mediante las expresiones (60) y (61) (Aguiar et al. 2008).

$$M^{(b)} \ddot{q} + C^{(b)} \dot{q} + K^{(b)} q = -M^{(b)} r^{(b)} \ddot{u}_g - r^{(s)t} M^{(s)} \ddot{u} \quad (60)$$

$$M^{(s)} \ddot{u} + C^{(s)} \dot{u} + K^{(s)} u = -M^{(s)} r^{(s)} \left[\ddot{q} + r^{(b)} \ddot{u}_g \right] \quad (61)$$

Donde q , \dot{q} , \ddot{q} son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración del sistema de aislamiento; $r^{(b)}$ es un vector que relaciona los grados de libertad del sistema de aislamiento con la componente sísmica de movimiento del suelo; u , \dot{u} , \ddot{u} son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración de los grados de libertad de la superestructura; $r^{(s)}$ es similar a $r^{(b)}$ pero en la superestructura. Tanto el vector como $r^{(s)}$ están compuestos únicamente por 0 y 1. El 1 se ubica 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 para sismo horizontal será \ddot{u}_{gx} , si es para sismo vertical será \ddot{u}_{gz} .

Se aclara 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. Para los dispositivos de aislamiento, la solución del sistema de ecuaciones diferenciales considera que \ddot{u}_g es una aceleración proveniente de la superestructura no influye en el movimiento de los dispositivos de aislamiento (Kulkarni J. et al, 2002). Para encontrar la respuesta en el tiempo de los dispositivos GCS, se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales indicado en (62).

$$M^{(b)} \ddot{q} + C^{(b)} \dot{q} + K^{(b)} q = -M^{(b)} r^{(b)} \ddot{u}_g \quad (62)$$

Para encontrar la respuesta de la superestructura se trabaja con la ecuación diferencial completa (60) y (61).

Edificio aislado la FRM. UTN. Un caso de estudio

Instrumental y registros sísmicos

El edificio aislado forma parte del complejo de la residencia universitaria de la Facultad Regional Mendoza de la UTN (Tornello y Sarrazin, 2007). El complejo está compuesto por tres edificios de idénticas características arquitectónicas y estructurales destinados a dormitorios de los cuales, uno de ellos posee los dispositivos de protección. Dentro del mismo complejo fueron construidos locales destinados a comedores, recepción y sala de lectura.

Los edificios cuentan con instrumental sísmico para monitorear la respuesta frente a la ocurrencia de sismos. Los datos permiten comparar la respuesta del edificio de base fija con el edificio aislado, ambos se encuentran a escasos metros de distancia. La instrumentación instalada permitiría contar con información, en puntos estratégicos, del edificio aislado y simultáneamente del edificio con fundación tradicional.

Los instrumentos instalados son acelerómetros marca Kinematics, modelo Altus K2 con un sensor triaxial interno. El mismo actúa como central de adquisición de datos y es el receptor de otros nueve canales externos de registros de aceleración, por lo tanto el sistema instalado tiene capacidad para el registro simultáneo de aceleración, de doce canales. La instrumentación sísmica se completa con un acelerómetro triaxial Kinematics (SSA- 2) ubicado en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad Regional Mendoza, totalmente compatible con los instalados en los dos edificios que cumple las funciones de registro en campo libre. En la Figura 34 se observan los sensores externos y la central de adquisición de los registros sísmicos de los doce canales.

Desde la instalación del instrumental se han registrado más de cien eventos sísmicos en la zona de emplazamiento de los edificios de los cuales solo algunos fueron sensibles para la población en general. En la Tabla 2 se resumen, para cada evento, los picos de aceleración, velocidad y desplazamiento. En la Tabla 3 se indican los desplazamientos horizontales máximos en el techo del edificio aislado y para el edificio con base fija. En las últimas dos columnas se indican los desplazamientos horizontales y verticales a nivel de los dispositivos de aislamiento.



Figura 34. Instrumental sísmico instalado en el edificio aislado y en el de base fija

Tabla 2. Características de los sismos sensibles registrados

Fecha	PGA [% g]	PGV [cm/s]	PGD [cm]
09/09/2005	1,60	0,68	0,10
09/05/2006	1,10	0,50	0,05
05/08/2006	12,40	3,85	0,43
15/09/2007	5,50	1,32	0,06
16/10/2008	4,50	1,46	0,05
11/03/2009	1,32	0,52	0,07
08/05/2009	1,34	0,76	0,05
27/02/2010	1,66	7,69	4,36
06/07/2011	1,82	0,53	0,02
18/06/2012	9,07	3,70	0,24
12/09/2012	1,14	0,49	0,03
28/11/2012	0,97	0,61	0,07
15/11/2013	1,22	0,77	0,09
02/02/2015	0,80	1,16	0,46
07/05/2015	0,79	0,28	0,01

Tabla 3. Desplazamientos máximo registrados a nivel techo y de dispositivos GCS

Fecha	Base Fija: Desplazamiento horizontal en el techo (mm)	Edificio Aislado: Desplazamiento horizontal en el techo (mm)	Edificio Aislado: Desplazamiento horizontal a nivel GCS (mm)	Edificio Aislado: Desplazamiento vertical a nivel GCS (mm)
09/09/2005	1,220	1,610	1,190	0,500
09/05/2006	0,650	1,000	0,730	0,250
05/08/2006	5,620	9,410	5,160	2,260
15/09/2007	1,810	0,780	0,430	0,170
16/10/2008	1,170	0,900	0,570	0,370
11/03/2009	0,786	1,276	0,863	0,419
08/05/2009	1,534	1,490	1,362	0,843
27/02/2010	42,944	45,569	42,933	73,979
06/07/2011	0,529	0,390	0,231	0,133
18/06/2012	3,763	3,932	2,603	1,467
12/09/2012	0,622	0,441	0,296	0,173
28/11/2012	0,923	1,129	0,713	0,409
15/11/2013	1,059	1,271	0,970	0,251
02/02/2015	4,695	5,543	5,299	0,796
07/05/2015	0,259	0,193	0,136	0,087

A título de ejemplo en la Figura 35 se muestran los acelerogramas del sismo del 05-08-2006 para las componentes de máxima aceleración en, campo libre, inmediatamente por encima de los dispositivos de aislamiento, en el techo del edificio aislado y en el techo del edificio de base fija. En la Figura 36 se grafican los valores de aceleraciones registradas en los dos edificios, para algunos sismos sensibles ocurridos en la región. En todos los casos puede observarse que las aceleraciones del edificio de base fija (BF) son considerablemente mayores que las registradas en el edificio aislado (GCS).

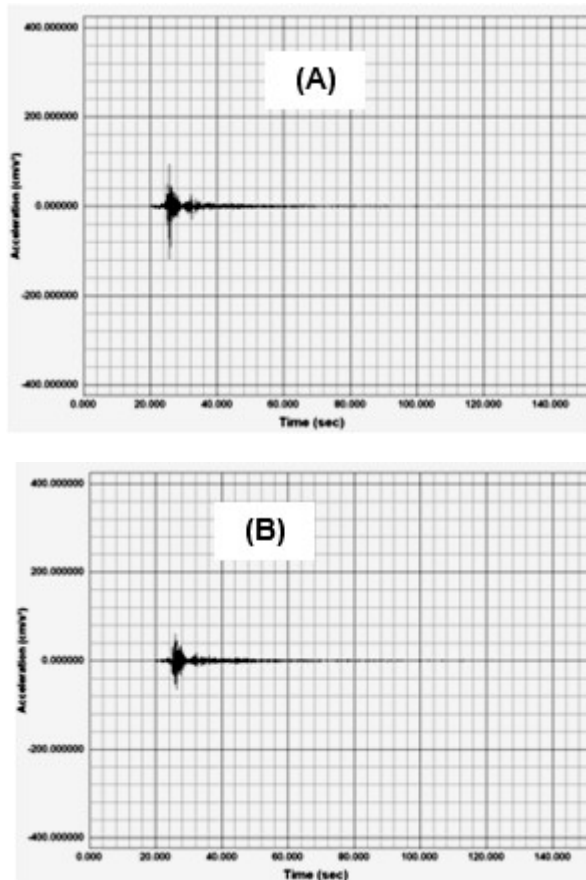


Figura 35. Acelerogramas del sismo del 05/08/2006. A) En campo libre; B) Por encima de los dispositivos;

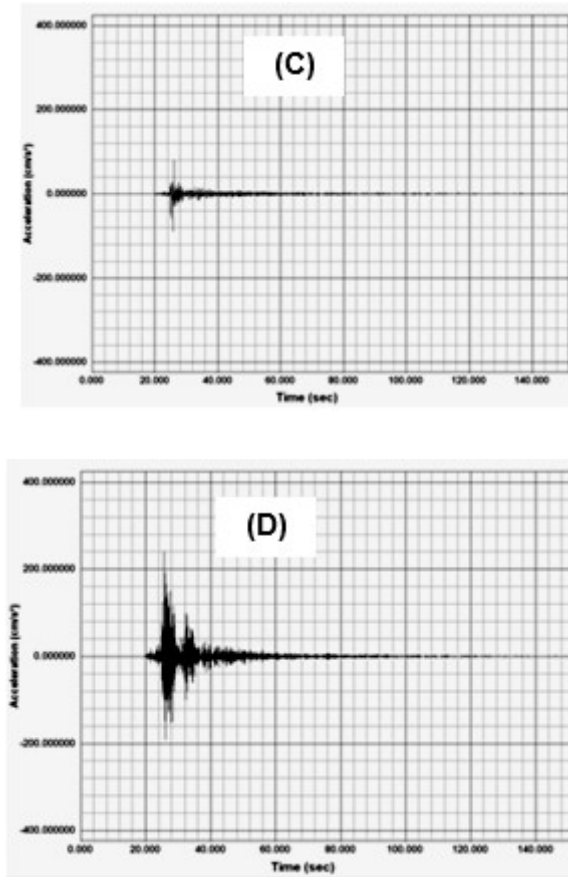


Figura 35. Acelerogramas del sismo del 05/08/2006. C) En el techo del edificio aislado; D) En el techo del edificio de base fija.

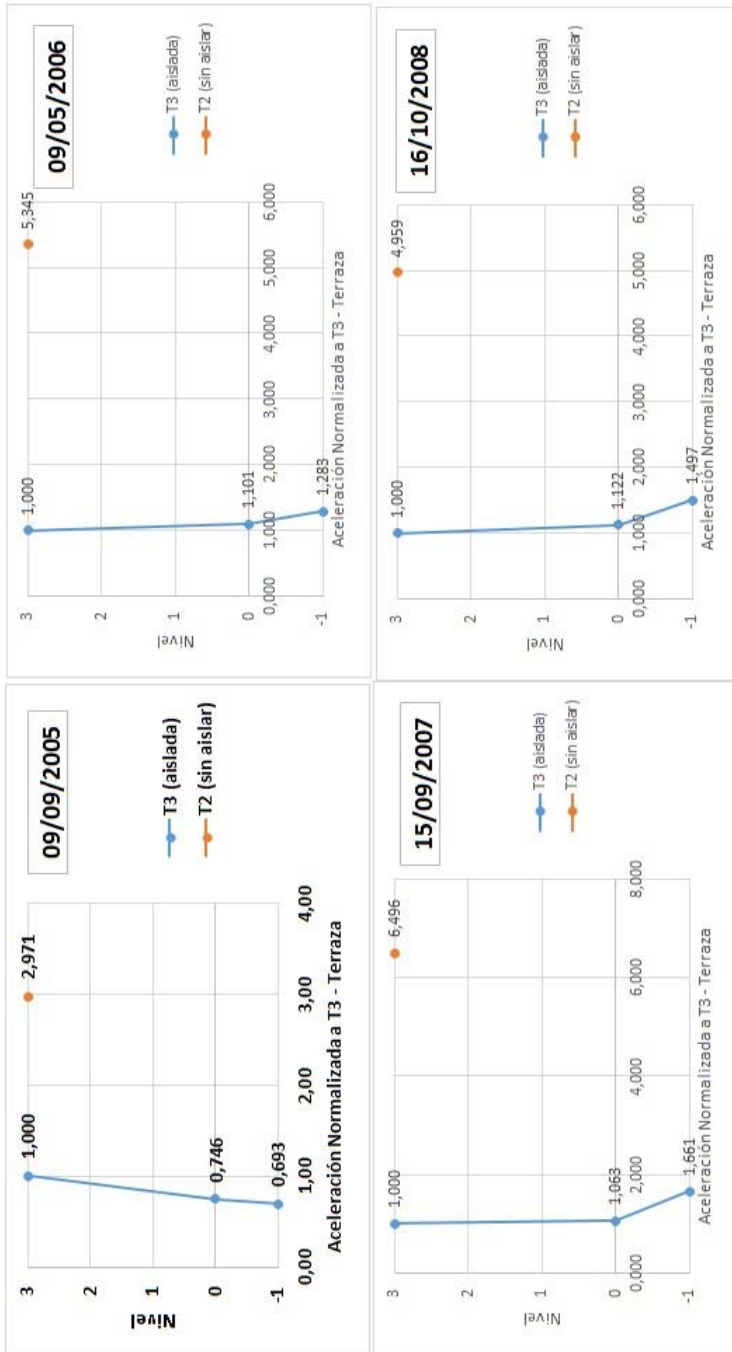


Figura 36. Aceleraciones registradas en cinco sismos sensibles. Edificio aislado (GCS). Edificio de base fija (BF) (2º Parte)

Referencias

- Aguiar R., (2007). *Dinámica de estructuras con MATLAB*. Quito, Ecuador: Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 292 p.,.
- Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P y Suárez V., (2008). *Aisladores de base Elastoméricos y FPS.*, Quito, Ecuador: Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. 292 p.,.
- Aguiar R., Tornello M., (2009). Modelo propuesto para el análisis sísmico de estructuras con aisladores se base tipo resortes. *ENIEF 2009*. ID-20. Publicado en Actas del Congreso. Tandil. Buenos Aires. Argentina.
- Aguiar R., Tornello M., Gioacchini G., (2009). Estimación de la respuesta sísmica de un edificio aislado mediante un modelo matemático sintético. *Encuentro de Investigadores y docentes de la Ingeniería. ENIDI 2009*. FRM UTN. Publicado en las Actas del Congreso. San Rafael. Mendoza. Argentina.
- Bozzo L., Mahin S., (1990). Response of elastic single degree of freedom systems supported on FPS connections. *Earthquake Engineering Research Center. University of California at Berkeley*. Report N. – UCB/EERC-89/09, 89/09. Chapter 8, 189-194. Berkeley.
- Bozzo L M., Mahin S. A., Zayas V. A., (2000). Design of friction base isolation systems. *4th US National Conference on Earthquake Engineering*. Palm Spring, California.
- Constantinou M. C.; Tadjbakhsh, I. G., (1984) The optimum design of a base isolation system with frictional elements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 12, 203-214.
- Constantinou M. C., Mokha, A. S., Reinhorn, A. M., (1990). Teflon bearing in base isolation II: Modelling. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 116 (2), 455-474.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico, (2011). Protección Sísmica de Estructuras. Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía. Documento Técnico N° 29. www.cdt.cl
- De La Llera J. C., Inaudi J. A., Lüderss C. (1998). Análisis y diseño de sistemas de aislación sísmica y disipación de energía. SIRVE.
- Fenz D. M. and Constantinou M. C. (2008). Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 37:163-183
- Kelly, J. M., (1991). Base Isolation: Linear theory and design. *Earthquake Spectra*, 7 (2), 301-323.
- Kelly J. M., (1993, 1996 2nd edition). *Earthquake-Resistant Design With Rubber*. Springer – Verlag. London.
- Kulkarni J.; Jangrid R., (2002). Rigid body response of base-isolated structures. *Journal of Structural Control* (9), 171-188.
- Martelli, A., (2005). Modern Seismic Protection Systems for Civil and Industrial Structures. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas. Concepción. Chile. CD. ISSN 0718-2678*.
- Mokha, A. S., Constantinou, M. C., Reinhorn, A. M., (1988). Teflon Bearing in A seismic Base Isolation: Experimental Studies and Mathematical Modeling. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEEER-88-0038. State University of New York at Buffalo.
- Mokha, A. S., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M., (1990). Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Response of Sliding Isolation System with a Spherical Surface. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEEER-90-0020. State University of New York at Buffalo.

- Naeim F.; Kelly J. M., (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*. Edit. John Wiley & Sons, Inc. Printed in the United States of America.
- Stuardi J., Massa J., Brewer A., (2005). 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. Noviembre 2005. Buenos Aires, Argentina. Facultad Ingeniería y Ciencias Exactas. Centro Estudios Avanzados Universidad Argentina de la Empresa.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2003). Desarrollo e implementación de un sistema de aislación sísmica para un edificio civil. *XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica*. Agosto de 2003. Mendoza. Argentina. CD. Paper 28. pp. 18.
- Tornello M., Sarrazin M., (2003). Protección de estructuras mediante aislamiento sísmico ubicadas en zonas de falla cercana. *XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*. Octubre 2006. Mar del Plata. Argentina.
- Tornello M., Michelini R., Pizarro N., (2004a). Solución habitacional para estudiantes universitarios. Descripción del proceso constructivo de un edificio con aislación sísmica de base. Modelo de referencia. Proyecto VIS. *II Simposio de la Vivienda en la sociedad de hoy*. Octubre-2004. Facultad Regional Mendoza. Argentina. Paper en CD.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2004b). 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., Revista semestral de la Escuela Politécnica del Ejército. Ecuador. Vol. 9, N° 1, 2004. pp. 71-91. SIN 1390-0315. © 2004 ESPE, Quito. Ecuador.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2004c). Respuesta dinámica en término de desplazamientos de un edificio con aislación sísmica de base para sismos de falla cercana. *XVIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*. Septiembre de 2004. Buenos Aires. Argentina. Paper en CD.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2004d). Implementación de un sistema de aislación sísmica para el edificio de la residencia universitaria de la Facultad Regional Mendoza. *Revista de Ciencia y Tecnología «Proyecto Leonardo»*. Editor: Facultad Regional Mendoza. Año 0. Vol. 1. Julio-2004. CD. SIN 1668-5784.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2005a). Respuesta estructural de dos sistemas de aislamiento sísmico frente a terremotos de fuente cercana. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas*. Noviembre de 2005. Paper N° A13-04. CD. SIN 07118-2678.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2005b). Control de desplazamiento de sistemas de aislamiento sísmico de base, para terremotos de falla cercana. *Primer encuentro de investigadores y docentes en Ingeniería. EnIDI*. Octubre de 2005. FRM. UTN, Facultad de Ingeniería. UNC. Mendoza. Argentina. ISBN 987-43-9997-X.
- Tornello M., Sarrazin M., (2007). Dynamic response of a Building with base isolation for near-fault motions. *9th Canadian Conference on Earthquake Engineering*. Paper N° 1057. Ottawa. CAEE, ACEP. Junio 2007. Ottawa. Canadá.
- Tornello M.E.; Frau C.D; Palazzo G. (2008). Behaviours of energy dissipation devices and seismic isolation in presence of near-fault ground motions. *Proceedings 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China. Octubre 2008.
- Tsopelas, P., Constantinou, M. C., (1994). NCEER-Taisei Corporation Research Program on

Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of a System Consisting of Sliding Bearing and Fluid Restoring Force/Camping Devices. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEER-94-0014. State University of New York at Buffalo.

Recibido: junio/2017

Aceptado: abril/2018