

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).

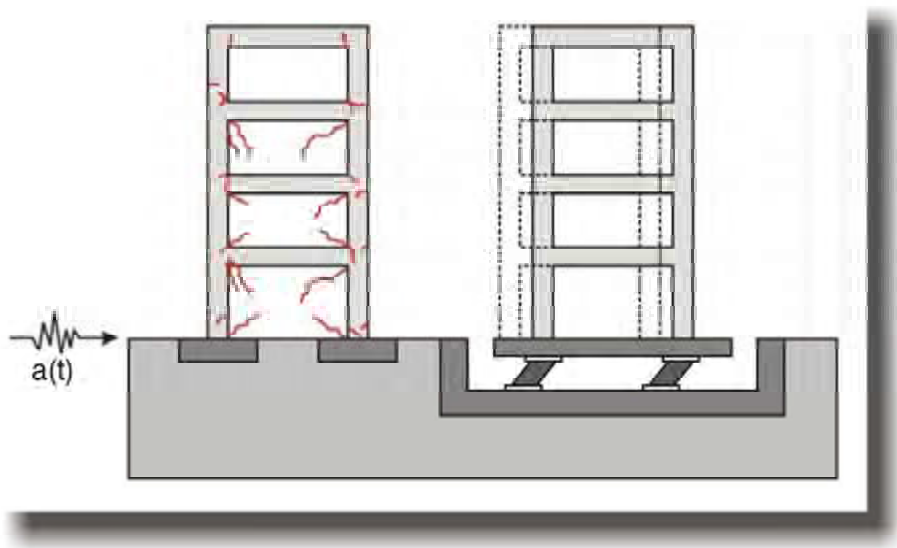


Figura 1. Respuesta de una estructura convencional y una aislada.

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.

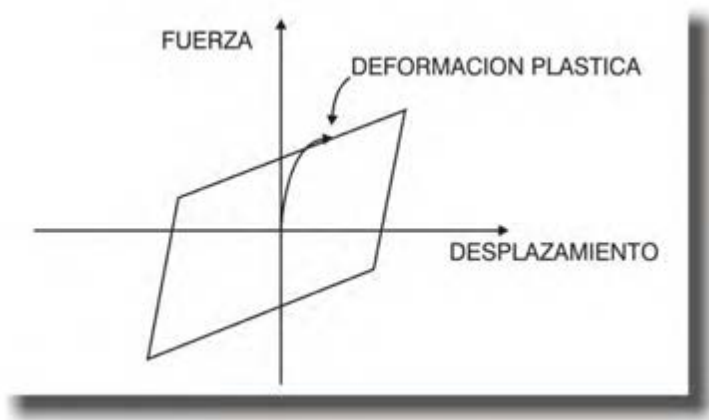


Figura 3. Ciclo de histéresis debido a una deformación plástica.

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).

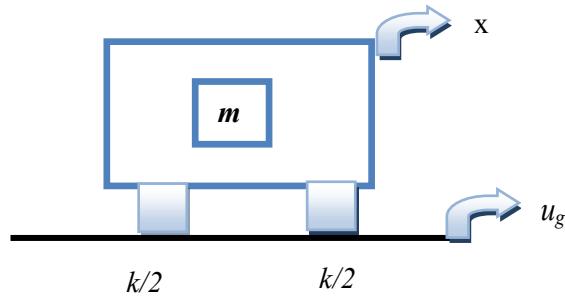


Figura 4. Representación esquemática del aislamiento sísmico.

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
$\Omega \rightarrow 0$	$T \rightarrow 1$
$\Omega \rightarrow 1$	$T \rightarrow \frac{\sqrt{1+4\beta^2}}{2\beta} \approx \frac{1}{2\beta}$
$\Omega \rightarrow \sqrt{2}$	$T \rightarrow 1$
$\Omega \rightarrow \infty$	$T \rightarrow \frac{2\beta}{\Omega}$

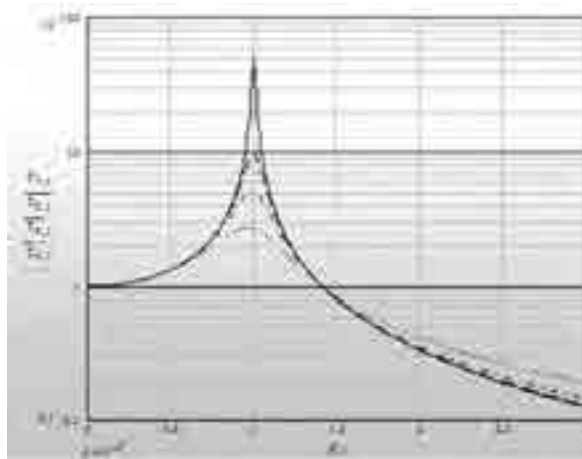


Figura. 5. Variación de la transmisibilidad T de un vibrador de un grado de libertad para amortiguamiento viscoso.

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).

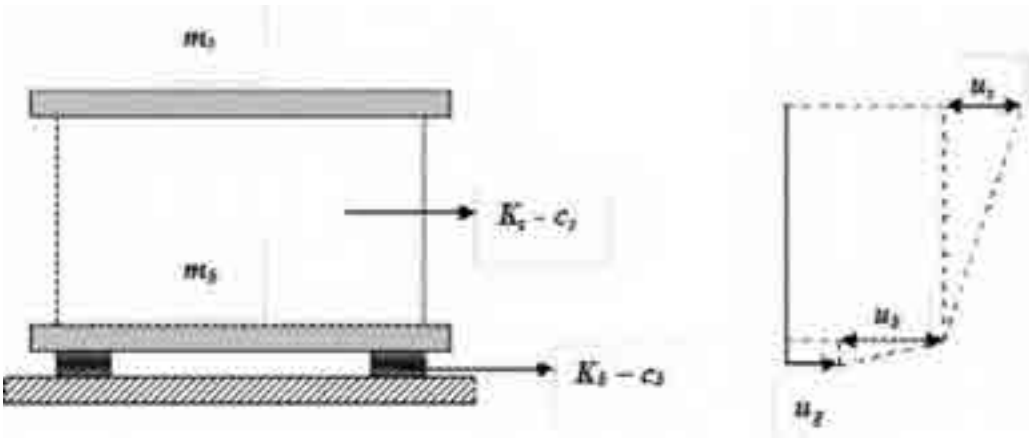


Figura 6. Modelo de 2 GDL para representar la estructura aislada.

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:

$$M_t = m_b + m_s \quad (13)$$

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)

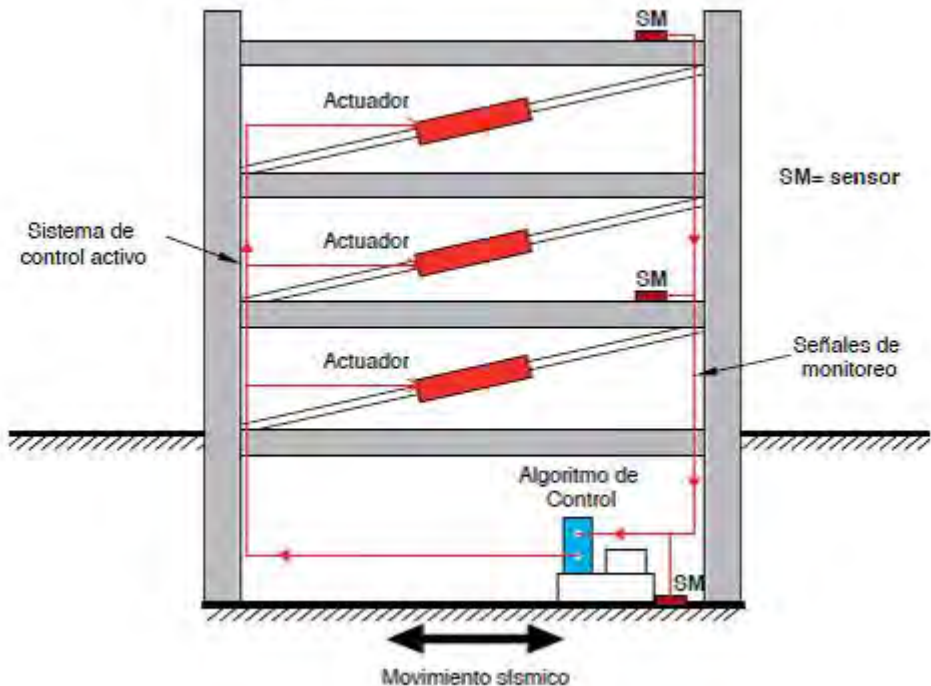


Figura 8. Esquema de estructura con sistema de control activo.

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)

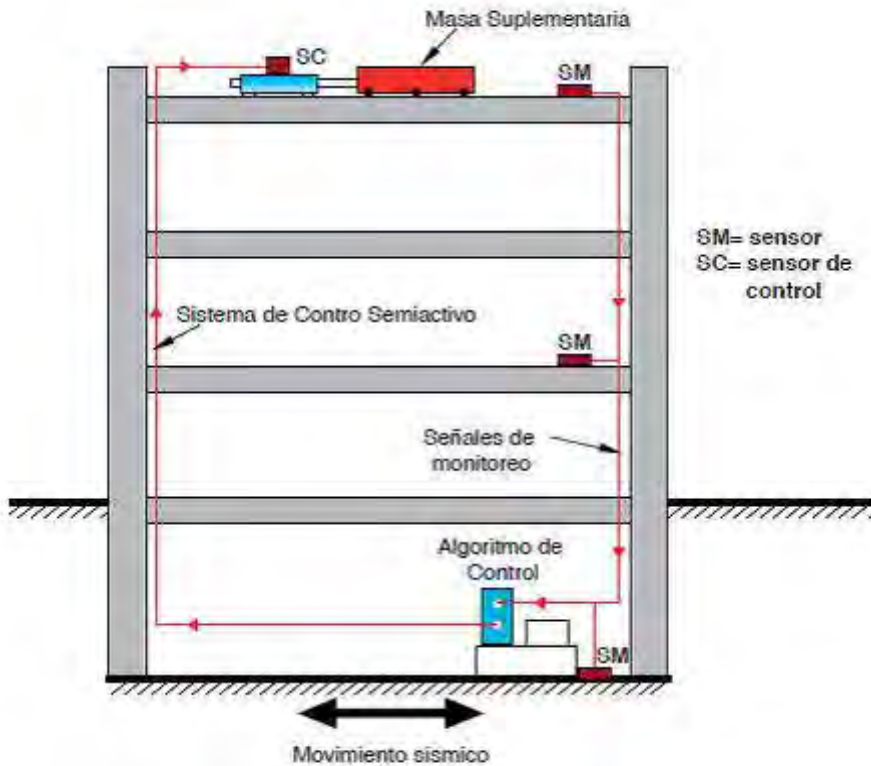


Figura 9. Esquema de estructura con sistema de control semiactivo.

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)