

SISTEMAS PASIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO

Nelson Molinares Amaya *

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se analiza el comportamiento de edificios con aislamiento sísmico, considerando el comportamiento no lineal de los principales tipos de aislamiento existentes (Fricción pura [PF], goma laminada [LRB], Flexible-friccionante [R-FBI], Electricité de France [EDF], Neozelandés [NZ] y Deslizamiento flexible-friccionante [SR-F]). En los ejemplos que se presentan se comparan las respuestas de edificaciones con y sin aislamiento sísmico. Los edificios sin ningún tipo de aislamiento, **[fixed base (FB)]**, son aquellos en los cuales la base de dicha edificación se encuentra empotrada directamente en el terreno. Un esquema de un edificio de base fija se muestra en la figura 1.

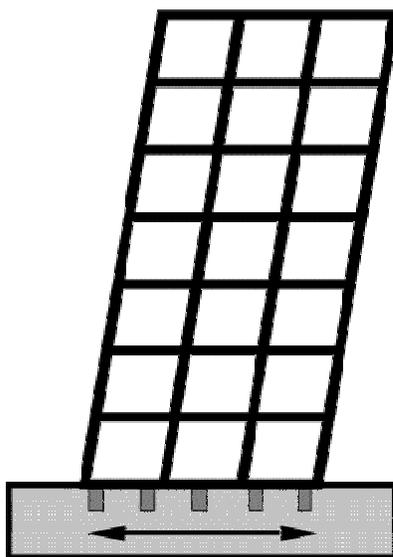


Figura 1. Edificio de base fija.

*Profesor del Departamento de Ingeniería Civil y Director del Grupo de Investigaciones en Estructuras y Geotecnia de la Universidad del Norte

En muchos casos, un sistema pasivo puede proporcionarle a la estructura una protección mucho mayor de la requerida por las condiciones de seguridad y la estructura se comporta de manera muy parecida a un sólido rígido.

Como ya lo han mencionado otros autores en trabajos anteriores, es muy complicado comparar el comportamiento sísmico entre edificios, ya que no existen unos criterios generalmente aceptados que permitan decidir su eficacia. A pesar de esta dificultad se han escogido los siguientes parámetros: el desplazamiento de la base respecto a la cimentación, el desplazamiento del punto más alto de la estructura respecto a la base y la aceleración absoluta de dicho punto.

El desplazamiento de la base respecto a la cimentación es un parámetro básico del diseño de instalaciones que unen al edificio con el terreno. El desplazamiento del punto más alto de la estructura respecto a la base es un parámetro proporcional a la tensión que soportan las columnas de la estructura. La aceleración absoluta del punto más alto de la estructura es fundamental, ya que determina el nivel de confort y además es la principal causante de daño en equipos contenidos en el edificio.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Se analiza un edificio como el de la figura 2. La estructura se modeliza como un edificio de cortante con un solo grado de libertad, correspondiente a la dirección horizontal de cada una de las plantas. A la base también se le atribuye un solo grado de libertad, correspondiente a la dirección horizontal. A fin de efectuar experiencias numéricas que simulen el efecto del sistema de aislamiento de base, se definen las características de un edificio de diez plantas.

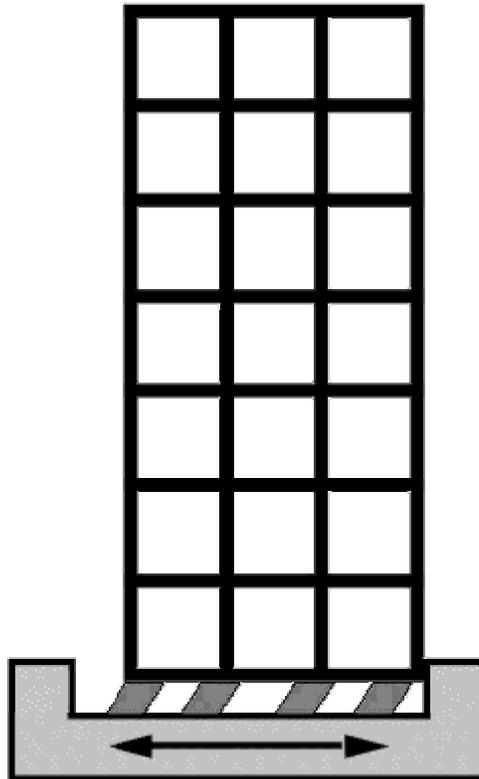


Figura 2. Modelo analizado

La masa de cada una de las plantas, así como la de la base es de $6 \times 10^5 \text{ Kg}$. La rigidez de las columnas varía en $5 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ entre plantas, desde $9 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ la primera hasta $4.5 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ la última. La fracción de amortiguamiento crítico se ha fijado en 0.05 para todos los modos de vibración.

El sistema de ecuaciones del movimiento (1) correspondiente a la estructura se desacopla, considerando en el análisis los tres primeros modos de vibración. De esta manera el sistema de ecuaciones a solucionar está formado por tres ecuaciones del tipo (2) a las que se les añade la ecuación (3).

$$M\ddot{D} + C\dot{D} + KD = -MJ [d_b + a(t)] \quad (1)$$

$$\ddot{y}_j(t) + 2\nu_j\omega_j\dot{y}_j(t) + \omega_j^2 y_j(t) = -\frac{\varphi_j^T MJ}{\varphi_j^T M \varphi_j} [\ddot{d}_b + a(t)] \quad (2)$$

$$m_b [d_b(t) + a(t)] + J^T M \left[\sum_1^q \varphi_i \ddot{y}_i(t) + J [\ddot{d}_b + a(t)] \right] + f = 0 \quad (3)$$

En algunos de los ensayos numéricos efectuados se ha considerado un modelo con un solo grado de libertad, de masa $6 \times 10^5 \text{ Kg}$, rigidez $9.6 \times 10^8 \frac{N}{m}$ y la masa de la base de $6 \times 10^5 \text{ Kg}$.

Las características del sistema de aislamiento varían en los diferentes ejemplos de simulación, según el tipo de aislamiento utilizado y serán descritas posteriormente a medida que éstos se utilicen.

DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO

Como ejemplos ilustrativos se definen en este trabajo otros dos tipos de aislamiento de base, obtenidos mediante combinación de sistemas elastoméricos con el de fricción pura.

Un primer sistema obtenido a partir de dicha combinación es el NZ+F-PAR, que combina en paralelo un sistema elastomérico con uno de fricción pura. Con el sistema NZ+F-PAR se pretende aumentar la capacidad de disipación de energía del apoyo elastomérico con núcleo de plomo agregándole una superficie friccionante.

Para una estructura aislada por medio de un sistema NZ+F-PAR, la ecuación del movimiento correspondiente a la base aislada está dada por

$$m_b [\ddot{d}_b + a(t)] + c_b \dot{d}_b + k_b d_b + J^T M \left[\sum_{i=1}^q \varphi_i \ddot{y}_i(t) + J [\ddot{d}_b + a(t)] \right] + f = 0 \quad (4)$$

Esta ecuación es similar a la correspondiente de un sistema neozelandés, con la diferencia de que la fuerza restituitiva f no es solamente histerética sino una combinación de histéresis y fricción.

La fuerza f , se define de la forma $f = f_1 + f_2$ donde f_1 es la fuerza restituitiva histerética, mientras que f_2 es la fuerza debida a los elementos friccionales.

f_1 es definida de la forma $f_1 = \alpha \frac{f^y}{d^y} d_b + (1 - \alpha) f^y z$ y f_2 está dada por

$$f_2 = \mu g J^T M J \text{sign}(d_b).$$

Cuando la masa de la base m_b se encuentra pegada a la cimentación, o sea que no ocurre deslizamiento $f_2 = 0$ por lo que la fuerza f quedaría como $f = f_1$. De esta manera, el sistema NZ+F-PAR se comporta como un apoyo elastomérico laminado con núcleo de plomo. Esto ocurre si se cumple también la condición de no deslizamiento, la cual es

$$\mu g - \left| a(t) + J^T \left[\sum_{i=1}^q \varphi_i \ddot{y}_i(t) \right] \right| > 0 \quad (5)$$

Si la ecuación (5) no se cumple, ocurre el deslizamiento, y la fuerza f estará definida por f_1 y f_2 .

El segundo sistema es el NZ+F-SER, que está constituido por el sistema neozelandés combinado con uno de fricción pura en serie. La idea básica del NZ+F-SER es la de suministrar al sistema neozelandés una medida de seguridad adicional frente a excitaciones excepcionales.

Cuando una estructura, aislada con un sistema NZ+F-SER, es sometida a una excitación sísmica $a(t)$, las ecuaciones del movimiento de la base durante el deslizamiento son expresadas como

$$m_b(\ddot{d}_b + a(t)) + J^T M \left[\sum_{i=1}^q \varphi_i \ddot{y}_i(t) + J(\ddot{d}_b + a(t)) \right] + f_2 = 0 \quad (6)$$

$$c_b \dot{x} + k_b x + f_1 + f_2 = 0 \quad (7)$$

donde f_2 es

$$f_2 = \mu g J^T M J \text{sign}(d_b - x) \quad (8)$$

y f_1 se expresa como

$$f_1 = \alpha \frac{f^y}{d^y} d_b + (1 - \alpha) f^y z \quad (9)$$

Cuando no ocurre deslizamiento, el aislamiento NZ+F-SER se comporta como un apoyo elastomérico y su movimiento está definido por las ecuaciones

$$m_b(\ddot{x} + a(t)) + c_b \dot{x} + k_b x + f_1 + J^T M \left[\sum_{i=1}^q \varphi_i \ddot{y}_i(t) + J(\ddot{d}_b + a(t)) \right] = 0 \quad (10)$$

$$\dot{d}_b - \dot{x} = 0 \quad (11)$$

Estas ecuaciones rigen el movimiento de la base aislada, dependiendo de la condición de no deslizamiento

$$\mu g - \left| a(t) + \ddot{d}_b + J^T \left[\sum_{i=1}^q \varphi_i \ddot{y}_i(t) \right] \right| > 0 \quad (12)$$

Si la condición (12) se cumple, las ecuaciones (10) y (11) son las que gobiernan el movimiento de la base, en caso contrario lo harán las ecuaciones (6) y (7).

A continuación se definen los parámetros que caracterizan cada uno de los sistemas de aislamiento.

Sistema de fricción pura [P_F]: Para que este sistema quede completamente definido, hace falta conocer el valor del coeficiente de deslizamiento utilizado, el cual se ha considerado

de $\mu = 0.165$.

Sistema de goma laminada [LRB]: Para el sistema de goma laminada, se ha fijado el factor de amortiguamiento crítico en 0.2 .

Sistema flexible-friccionante [R_FBI]: Se toma $\mu = 0.04$ y el factor de amortiguamiento crítico se fija en 0.1 , quedando definido de esta manera el sistema.

Sistema electríté de France [EDF]: Para simular este sistema de aislamiento, se toma un valor del coeficiente de deslizamiento $\mu = 0.2$.

Sistema neozelandés [NZ]: Para definir el comportamiento histerético del sistema neozelandés, las constantes que definen dicho comportamiento se fijan en $A = 1$, $\nu = 0.5$, $\gamma = 0.5$ y $n = 1$. Además, la fuerza y el desplazamiento de fluencia se fijan en

$f^y = 1.5 \times 10^3 \text{ N}$ y $d^y = 0.0245 \text{ m}$. Para la simulación de este sistema de aislamiento se utiliza un factor de amortiguamiento crítico de 0.2.

Sistema de deslizamiento flexible-friccionante [SR_F]: Para la simulación de este sistema de aislamiento se utilizan $\mu_1 = 0.04$, $\mu = 0.1$ y el factor de amortiguamiento crítico 0.1.

Sistema NZ+F-PAR: Para la simulación de este sistema de aislamiento se utiliza un coeficiente de deslizamiento $\mu = 0.165$, igual al del sistema de fricción pura.

Sistema NZ+F-SER: Para la simulación de este sistema se utiliza un coeficiente de deslizamiento $\mu = 0.1$.

EFFECTO DE DIFERENTES SISTEMAS DE AISLAMIENTO EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Introducción

En esta sección se estudian las respuestas de estructuras aisladas, utilizando los diferentes sistemas de aislamiento definidos y el modelo de un solo grado de libertad descrito en el apartado anterior.

Para comparar los diferentes sistemas de aislamiento entre sí, se ha variado el período de la estructura desde 0.1 s hasta 1 s y se han calculado las respuestas máximas para cada uno de estos períodos. Las excitaciones utilizadas para este análisis son la componente N-S del terremoto de El Centro (1940) [figura 3] y la componente E-W del terremoto de Ciudad de México (1985) [figura 4]. Se han escogido estas dos excitaciones por que son representativas de dos tipos de terremotos con diferente contenido frecuencial. El terremoto

de El Centro es un terremoto de contenido frecuencial típico para California, mientras que el de Ciudad de México es un claro ejemplo de bajo contenido frecuencial.

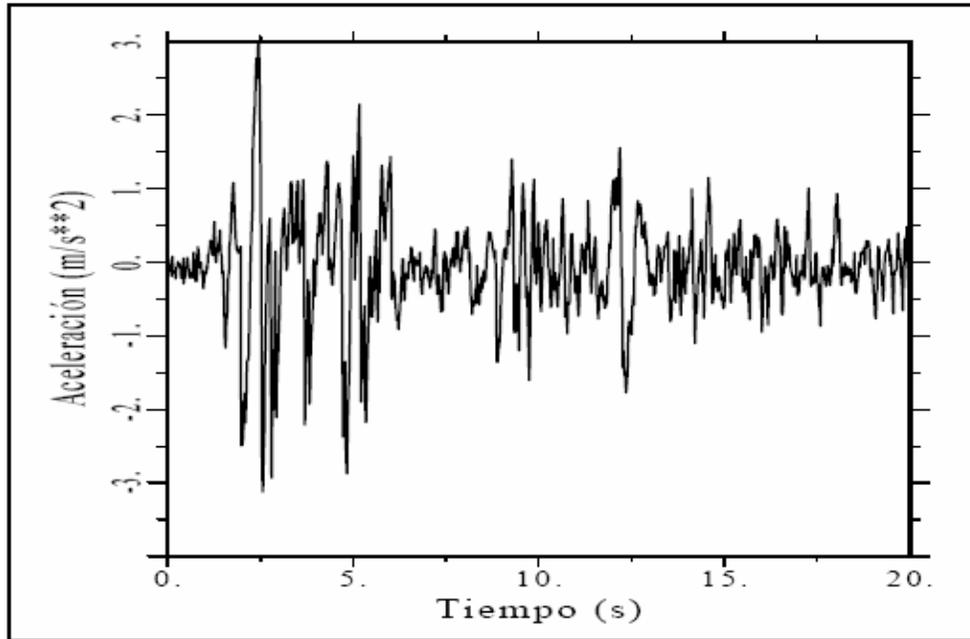


Figura 3. Componente N-S del terremoto de El Centro (1940)

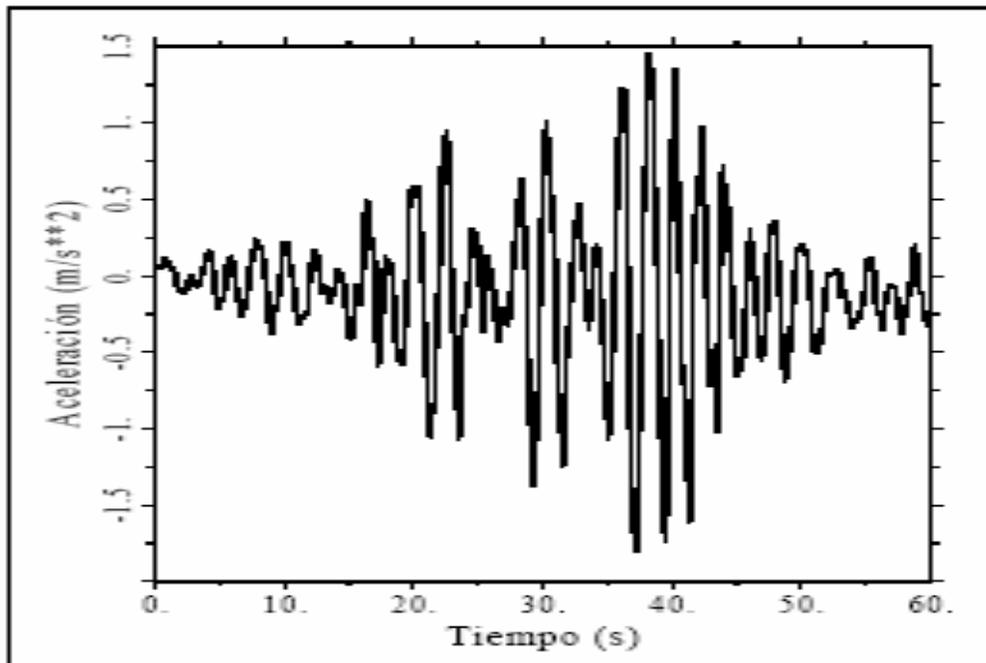


Figura 4. Componente E-O del terremoto Ciudad de México (1985)

Respuestas frente al terremoto de El Centro

En la figura 5 se muestra la aceleración absoluta máxima en el punto más alto de la estructura para diferentes períodos naturales de la estructura. Analizando el gráfico de esta figura, se puede ver que se presentan reducciones de la aceleración absoluta máxima en dicho punto, desde el 3% hasta el 10%, cuando se compara la estructura aislada mediante cualquier sistema de aislamiento con la estructura de base fija. Se debe también resaltar que, según los resultados de la figura 5, los sistemas de aislamiento que presentan algún tipo de fricción transmiten altas aceleraciones a la estructura.

Esta afirmación se confirma en la figura 6, en la cual, al comparar el sistema neozelandés con los sistemas NZ+F-PAR, NZ+F-SER y la estructura de base fija, se puede ver como al agregarle fricción al sistema neozelandés, ya sea en paralelo o en serie, se aumentan los valores de la aceleración absoluta máxima del punto más alto de la estructura a lo largo de todo el rango de períodos naturales de la estructura.

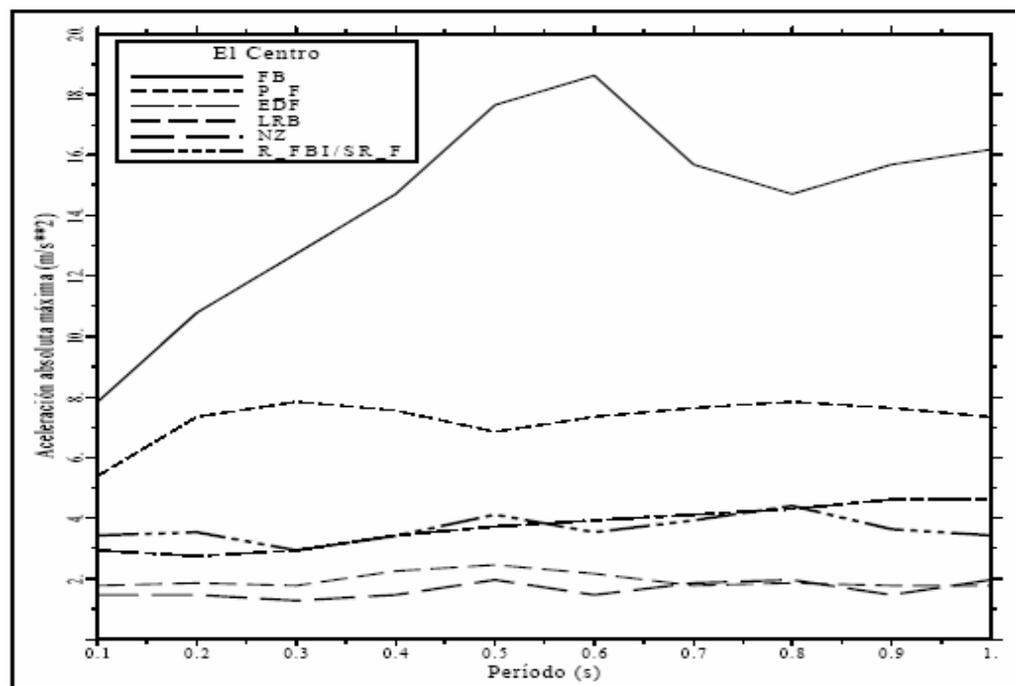


Figura 5. Aceleración absoluta máxima.

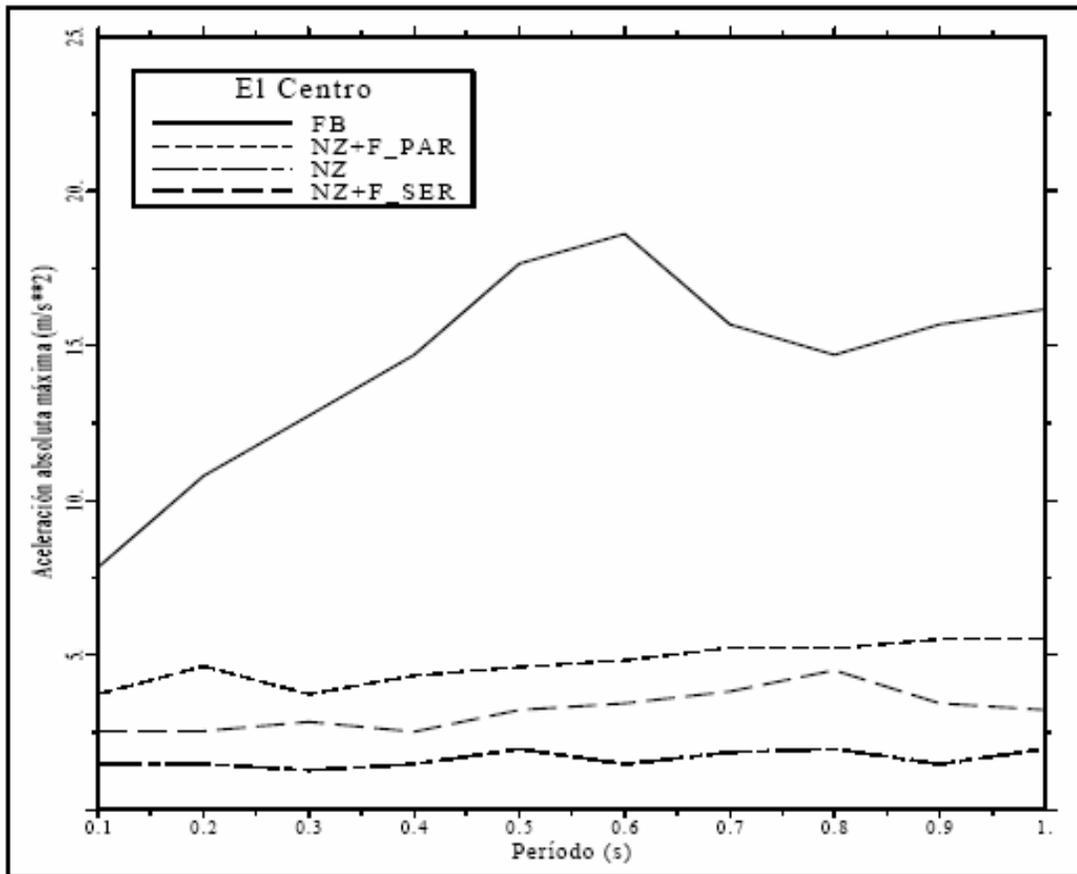


Figura 6. Aceleración absoluta máxima.

En la figura 7 se compara el máximo desplazamiento relativo entre la base y la cimentación producido por diferentes sistemas de aislamiento, para diferentes períodos naturales de la estructura. En dicha figura se puede ver que, para los diferentes sistemas de aislamiento, el desplazamiento máximo de la base respecto a la cimentación permanece más o menos constante a lo largo del rango de períodos considerados. El comportamiento mostrado por todos los sistemas de aislamiento analizados en la figura 7 confirma la suposición de que las estructuras con aislamiento de base se comportan como un sólido rígido. También es de destacar que el desplazamiento máximo de la base es alto para el sistema LRB y muy bajo para el de fricción pura.

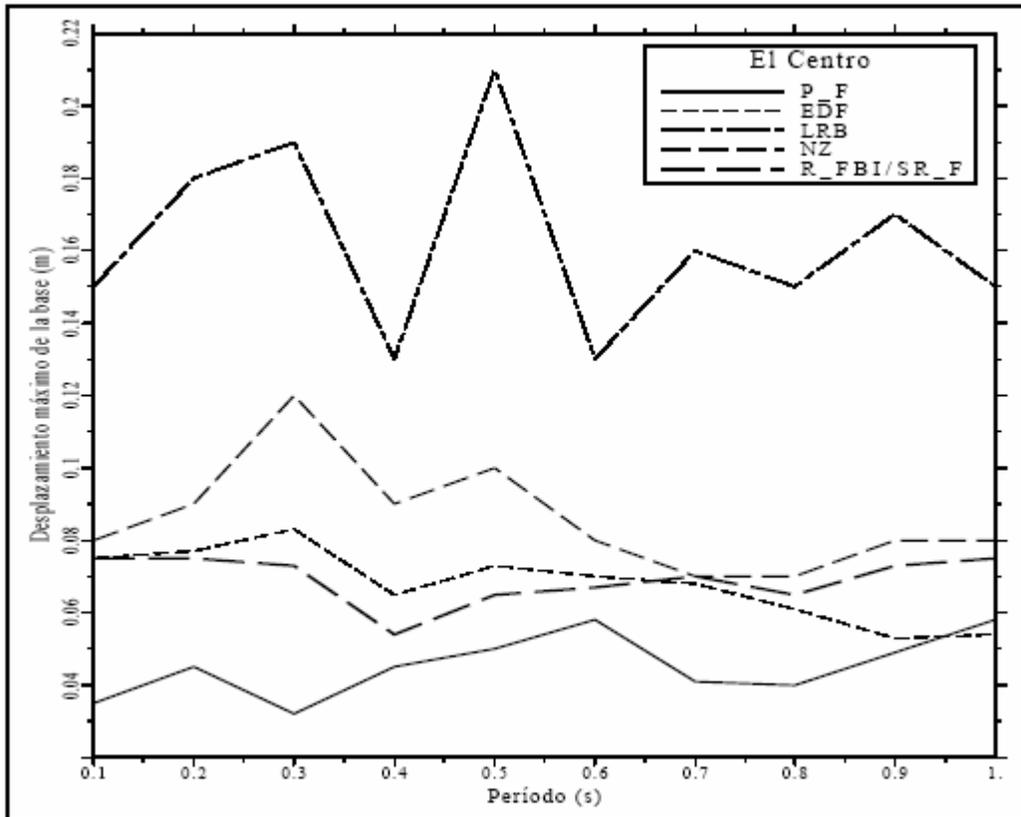


Figura 7. Desplazamiento máximo de la base

Respuestas frente al terremoto de Ciudad de México

El terremoto de Ciudad de México (1985) presenta ciertas características peculiares, entre las que destaca su prolongado comportamiento sinusoidal en una frecuencia muy cercana a los 2 s . Esta característica es muy importante, ya que la mayoría de los sistemas de aislamiento de base son diseñados con un período natural muy cercano a este rango, por lo que este terremoto es de particular interés al analizar el comportamiento de varios sistemas de aislamiento de base.

El desplazamiento máximo del punto más alto de la estructura con respecto a la base es mostrado en la figura 8, en donde se puede ver que ninguno de los sistemas de aislamiento

analizados funciona adecuadamente. Además el sistema NZ presenta valores mayores que el modelo de base fija a lo largo de todo el rango de períodos analizado. Esto se debe a que el terremoto de ciudad de México (1985) presenta una considerable cantidad de energía en el rango de frecuencias alrededor de 0.5 Hz , la cual coincide con la frecuencia natural del NZ. También se puede ver que los sistemas NZ+F-PAR y NZ+F-SER presentan un comportamiento casi igual, ya que al añadirle fricción al sistema de aislamiento NZ se logra mejorar su comportamiento a lo largo de todo el rango de períodos analizado.

En la figura 9, vuelven a ser comparados los sistemas NZ, NZ+F-PAR y NZ+F-SER con el modelo de base fija, pero utilizando ahora como parámetro la aceleración del punto más alto de la estructura. Se puede ver claramente como a partir de $T = 0.5 \text{ s}$ los sistemas NZ+F-PAR y NZ+F-SER mejoran en forma considerable el comportamiento del sistema NZ frente al modelo de base fija.

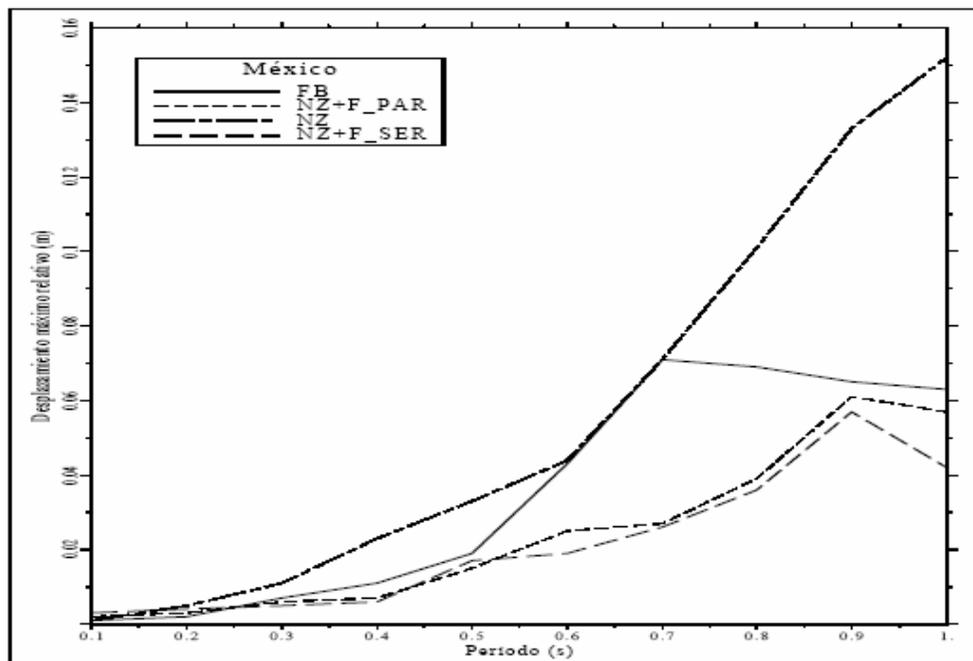


Figura 8. Máximo desplazamiento relativo

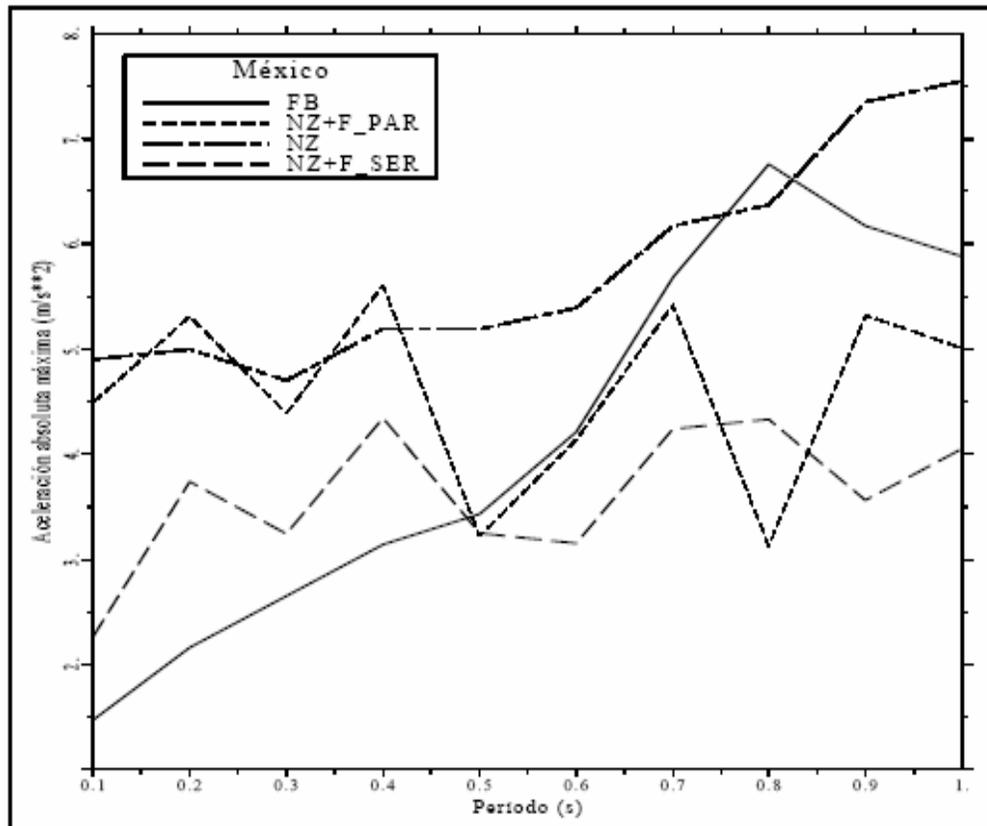


Figura 9. Aceleración absoluta máxima

Respuestas temporales

Para el modelo de diez grados de libertad frente al terremoto de El Centro, se calcula la historia en el tiempo del desplazamiento de la base con respecto a la cimentación y del desplazamiento relativo del punto más alto de la estructura respecto a la base, para tres diferentes sistemas de aislamiento.

Los sistemas de aislamiento analizados son el neozelandés, NZ+F-PAR y NZ+F-SER.

La variación en el tiempo del desplazamiento de la base se muestra en la figura 10, mientras que la variación en el tiempo del desplazamiento relativo es ilustrado en el gráfico de la figura 11.

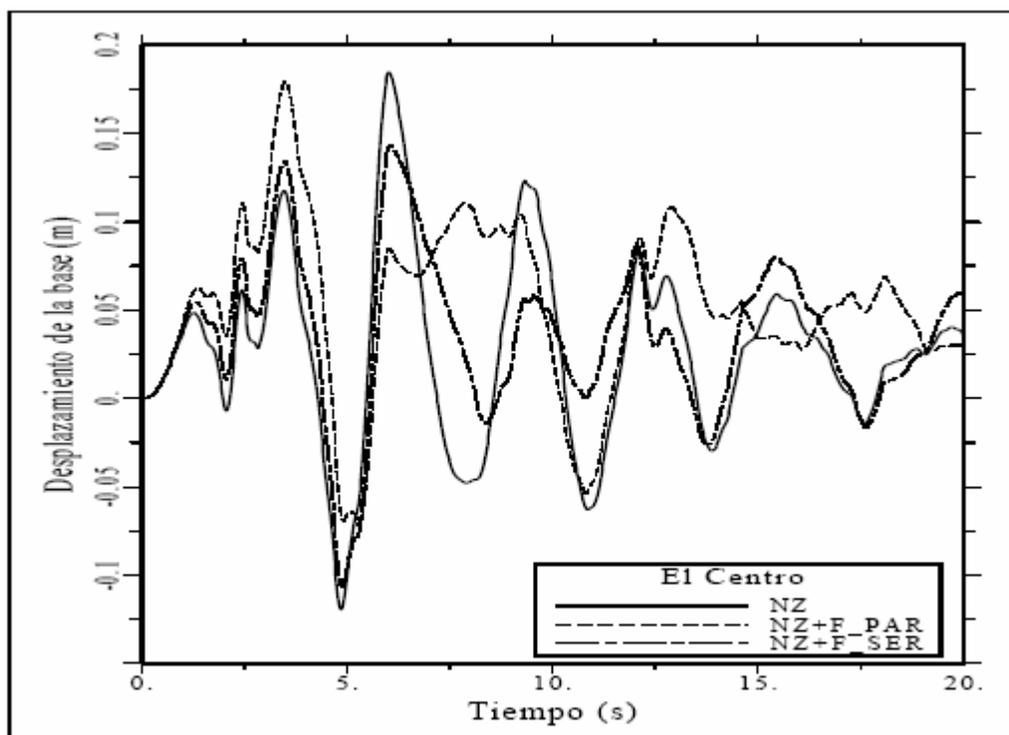


Figura 10. Desplazamiento de la base con respecto a la cimentación

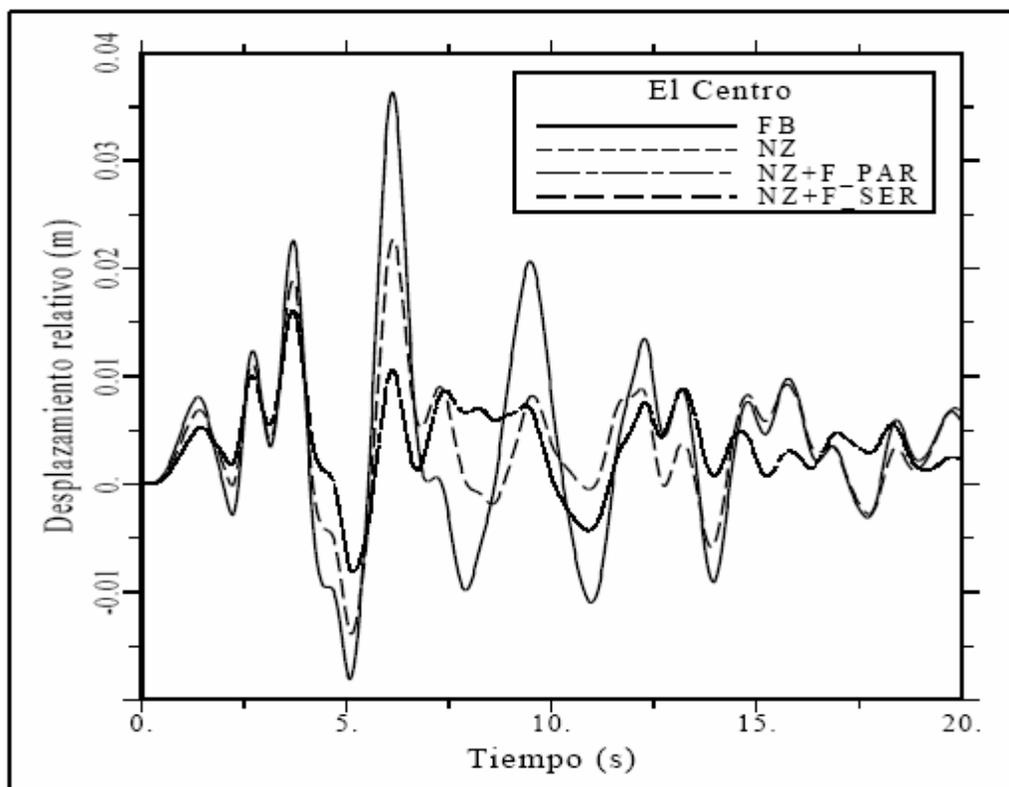


Figura 11. Desplazamiento del punto más alto de la estructura con respecto a la base

CONCLUSIONES

Después de comparar el efecto de los diferentes sistemas de aislamiento de base entre sí, frente a excitaciones cuyo contenido frecuencial es diferente a la frecuencia del aislamiento, se destaca el hecho de que, cuando éstos presentan algún tipo de fricción, transmiten altas aceleraciones a las estructuras, disminuyendo el confort dentro de ellas.

La contraparte de esta desventaja de los sistemas de aislamiento con fricción es el hecho de que, frente a terremotos con frecuencias predominantes bajas similares al de ciudad de México, ante el cual los sistemas elastoméricos amplifican las respuestas, éstos presentan valores de respuesta mucho menores a costa de un moderado desplazamiento de la base.

En consecuencia se recomienda la combinación de sistemas elastoméricos con friccionales, de manera que se obtengan condiciones adecuadas de seguridad y confort frente a todo tipo de excitaciones sísmicas.

Las anteriores afirmaciones son refrendadas al quedar demostrado que los sistemas combinados, como el NZ+F-PAR ó NZ+F-SER, presentan comportamientos adecuados intermedios entre el NZ y el PF frente a todo tipo de excitaciones y diferentes tipos de estructuras.

REFERENCIAS

1. **Kirikov B.**, *History of Earthquake Resistant Construction*, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, 1992.
2. **Skinner R. I., Robinson W. H. y McVerry G. H.**, *An Introduction to Seismic Isolation*, Jhon Wiley & Sons, Chichester, 1993.
3. **Molinares N. y Barbat A. H.**, *Edificios con Aislamiento de Base No Lineal*, Monografía **CIMNE IS-5**, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, 1994.

4. **Yao J. T. P.**, *Concept of Structural Control*, Journal of Structural Division, ASCE Vol. 98, N° 7, 1567-1574, 1972.
5. **Rodellar J. y Ryan E. P.**, *Adaptative Control of Uncertain Coupled Mechanical Systems*, 12th IFAC World Congress, Sydney - Australia, 1993.
6. **Kelly J. M., Leitmann G. y Soldatos A. G.**, *Robust Control of base-isolated structures Under Earthquakes Excitation*, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 53 N°2, 159-180, 1987.
7. **Inaudi J., y Kelly J. M.**, *A Simple Active Isolation Scheme*, Eighth VPI & SU Symposium on Dynamics and Large Structures, Blacksburgh, VA, 219-231, 1991.
8. **Nagarajaiah A. M., Reinhorn A. M. y Constantinou M. C.**, *3D-BASIS – Nonlinear Dynamic análisis of Three – Dimensional Base Isolated Structures: Part II*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, Technical Report NCEER, N°91, 0005, 1991.
9. **Way D. y Jeng V.**, *NPAD – A Computer Program for the Analysis of Base Isolated Structures*, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Pennsylvania, PVP, N° 147, 65-94, 1988.
10. **Barbat A. H., Rodellar J., Ryan E. P. y Molinares N.**, *Active Control of Nonlinear Base-Isolated Buildings*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE 121-6, 676-684, 1995.
11. **Barbat A. H., Molinares N. y Rodellar J.**, *Control Activo No Lineal de Edificios con aislamiento de Base*, Monografía **CIMNE IS-8**, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, 1994.
12. **Wen Y-K**, *Method for Random Vibration of Hysteretic Systems*, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 102, 249-263, 1976.