

Estudio Experimental de Aisladores Sísmicos Tipo Péndulo de Fricción en Modelos a Escala Reducida

D. M. Moreno

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

L. E. Yamín

Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia

J. C. Reyes

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

RESUMEN: Teniendo en cuenta los avances ocurridos en los últimos años en la ingeniería sísmica, se propone la utilización de diferentes tipos de dispositivos para la disminución del nivel de daño que sufren las estructuras durante un evento sísmico. Uno de estos dispositivos es el aislador sísmico tipo Péndulo de Fricción (FPS, por su nombre en inglés, Friction Pendulum System), desarrollado y patentado por Earthquake Protection Systems Inc. La evaluación del comportamiento de estos dispositivos se hace utilizando un modelo a escala reducida de un edificio metálico y de la superestructura de un puente. Los resultados obtenidos permiten establecer las propiedades del dispositivo y verificar el cumplimiento de las ecuaciones del problema.

ABSTRACT: Considering the advances happened in last years in seismic engineering, we propose the use of different types of devices for the decrease of the level of damage that structures suffer during a seismic event. One of these devices is the Friction Pendulum System bearing, developed and patented by Earthquake Protection Systems Inc. The evaluation of the behavior of these devices is made using a reduced scale model of a metallic building and another of the superstructure of a bridge. The obtained results allow to establish the properties of the device and to verify the equations of the problem.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Para mejorar la seguridad y el comportamiento estructural ante sismos severos se desarrollaron técnicas efectivas y confiables basadas en los sistemas de control de movimiento. Entre los esquemas de control desarrollados, el aislamiento sísmico es una de las alternativas más promisorias. Puede adoptarse tanto para el diseño de estructuras nuevas como para la rehabilitación de estructuras existentes de puentes y edificaciones.

El concepto de aislamiento sísmico es sencillo: reducir las fuerzas inducidas por el sismo en una estructura, mediante el incremento de su periodo fundamental o agregando amortiguamiento al sistema o mediante la combinación de estos dos parámetros. Gran parte de los sistemas de aislamiento se incluyen en esta combinación.

Aunque el concepto de proteger las estructuras de un movimiento sísmico introduciendo sistemas de

aislamiento fue propuesto hace casi un siglo, sólo hasta hace unos años se ha convertido en una estrategia práctica para el diseño sísmo resistente de estructuras (Chopra, 2000). En general los aisladores sísmicos tienen cuatro funciones importantes (Skinner, 1993; Kelly, 1997):

- Transmitir la carga vertical (p.ej. Carga Muerta), en el caso de un puente, de la superestructura a la infraestructura mientras que ocurren los efectos de creep, retracción de fraguado, retracción por temperatura, etc. (i.e., funcionan de manera similar que un apoyo común de neopreno).
- Para aislar la parte apoyada sobre el sistema introduciendo flexibilidad en el plano horizontal o limitando el cortante horizontal que puede ser transmitido.
- Suministrar rigidez suficiente para un nivel de cargas bajo, tales como viento, carga viva y sismos menores.
- Introducir amortiguamiento adicional en el sistema ya que los desplazamientos relativos a través

de los aisladores pueden controlarse. En algunos casos el amortiguamiento se suministra directamente por los aisladores; en otros casos se instalan dispositivos adicionales (p.ej. amortiguadores viscosos) que proveen dicho amortiguamiento.

Durante un sismo la estructura convencional sin aislamiento sísmico está expuesta a grandes deformaciones que pueden causar daño severo y hasta colapso de la misma, mientras que una estructura aislada vibra casi como un cuerpo rígido con grandes deformaciones o desplazamientos soportados por el sistema de aisladores. Las fuerzas laterales del sistema aislado no sólo se reducen sino que se redistribuyen de forma equitativa en la misma disminuyendo el momento de volcamiento del sistema.

Los sistemas de aislamiento utilizados de forma general incluyen los aisladores con núcleo de plomo (Lead Rubber Bearings, en inglés) y los aisladores de alto amortiguamiento (High Damping Rubber Bearings, en inglés). Por otra parte, Los aisladores de tipo deslizante son imprácticos debido a la falta de capacidad de restauración a su posición original. Para superar esta desventaja el sistema de péndulo de fricción (FPS, en inglés) originado en los apoyos de tipo deslizante, se desarrolló introduciendo una interfaz friccionante esférica que suministra la rigidez que restaura el sistema en su posición original, mientras que la fricción entre las superficies deslizantes contribuye con la disipación de energía. Como resultado, el FPS es funcionalmente equivalente a los LRB y HDRB ya que aumenta el periodo fundamental de la estructura, con ventajas adicionales como la no variación del periodo, resistencia a la torsión, no es sensible a cambios de temperatura y la durabilidad del aislador. Aunque los apoyos elastoméricos han sido utilizados ampliamente en aislamiento sísmico; recientemente los FPS han incrementado su aplicabilidad (Buckle et al., 1990; Zayas et al., 1987; Kawamura et al.).

Los sistemas de péndulo de fricción proporcionan resistencia y estabilidad más allá de la suministrada por los elastómeros. Sus propiedades no se afectan con el paso de los años y la temperatura. El bajo perfil de los apoyos, su alta resistencia, y su gran rigidez vertical reducen los costos de instalación. Estos apoyos ofrecen propiedades que pueden satisfacer diversos requerimientos en puentes, edificios, etc. El objetivo principal de este trabajo es estudiar experimentalmente el comportamiento y posible implementación de los aisladores sísmicos con Sistema de Péndulo Fricción en el entorno nacional. La evaluación se hace utilizando modelos a escala 1:6 de los dispositivos fabricados en acero y modelos a escala 1:6 de un puente y un edificio.

1.2 Marco teórico

Los sistemas de péndulo de fricción son aisladores sísmicos de acero inoxidable que constan de una superficie cóncava, un patín esférico articulado y una platina de cubierta (ver Figura 1). Durante un sismo, el patín articulado se desliza en la superficie cóncava generando en la estructura soportada pequeños movimientos de péndulo (ver Figuras 2 y 3). La fuerza de fricción dinámica genera el amortiguamiento necesario para absorber la energía de entrada. En consecuencia, las fuerzas y movimientos laterales transmitidos a la estructura se reducen en gran proporción.



Figura 1. Aislador de Péndulo de fricción (FPS)

El diseño de estos elementos se simplifica por el hecho de que el periodo del aislador, la capacidad de carga vertical, el amortiguamiento, la capacidad de desplazamiento y su capacidad a tensión pueden seleccionarse de forma independiente.

El periodo natural (T) del aislador se selecciona definiendo el radio de curvatura de la superficie cóncava (R) así:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1)$$

donde g es la aceleración de la gravedad. Como se observa, el periodo es independiente de la masa de la estructura soportada. La rigidez lateral del aislador (K_b) que proporciona la capacidad de restauración del sistema es:

$$K_b = \frac{W}{R} \quad (2)$$

donde W es el peso de la estructura. Como resultado, los movimientos torsionales de la estructura se reducen ya que el centro de rigidez de los aisladores

coincide con el centro de masa de la estructura soportada.

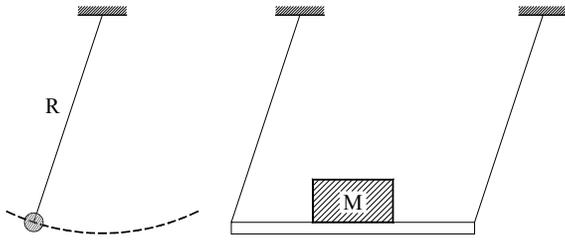


Figura 2. Movimiento pendular

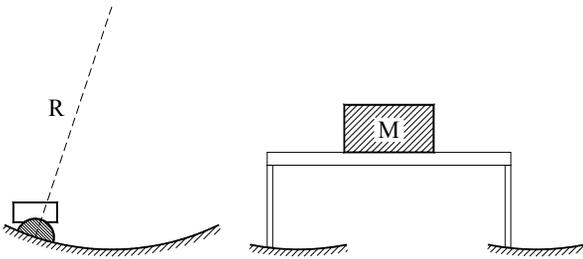


Figura 3. Movimiento de péndulo deslizante

2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS EXPERIMENTALES

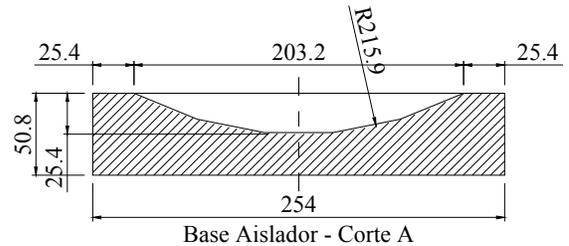
2.1 Montaje

Cualquier modelo que se construya en el laboratorio tiene un factor de escala geométrica óptimo. Los modelos estructurales muy pequeños requieren simulaciones con cargas de igual magnitud, lo cual es una ventaja significativa, pero desafortunadamente son muy complicados de fabricar y de instrumentar. La mesa vibratoria utilizada en los ensayos (CITEC Uniandes), tiene dimensiones de 1.05 x 1.05 metros, con un grado de libertad (horizontal) y capacidad para soportar un peso máximo de 450 kgf. Las dimensiones y características de dicha mesa condicionaron las dimensiones y por ende la escala geométrica del modelo estructural utilizado que siguió las recomendaciones de Harris y Sabnis (1999) (ver Tabla 1).

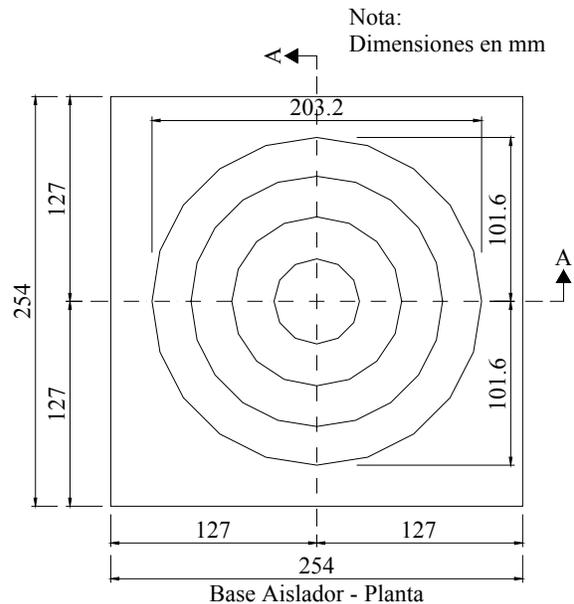
Los aisladores se diseñaron y construyeron con base en la capacidad máxima de los equipos a utilizar en los ensayos con el fin de no excederla. En total se fabricaron 4 aisladores en acero A36 ya que los aceros de alta resistencia especificados en los aisladores fabricados por EPS son de un costo mayor e innecesario, se necesitaba que resistieran los dos ensayos a que serían sometidos.

Tabla 1. Requisitos del modelo a escala

Material	F. Escala	Númérico
Esfuerzo	S_E	1
Módulo de Elasticidad	S_E	1
Relación de Poisson	1	1
Densidad de Masas	S_E / S_L	1 / 6
Geometría	F. Escala	Númérico
Dimensión Lineal	S_L	6
Desplazamiento lineal	S_L	6
Desplazamiento angular	1	1
Area	S_L^2	36
Inercia	S_L^4	1296
Cargas	F. Escala	Númérico
Carga concentrada	$S_E S_L^2$	36
Carga lineal	$S_E S_L$	6
Momento	$S_E S_L^3$	216
Otras	F. Escala	Númérico
Masas	S_E / S_L^2	0.028
Frecuencias	$1 / S_L^{0.5}$	0.408
Tiempo registro	$S_L^{0.5}$	2.45



Base Aislador - Corte A

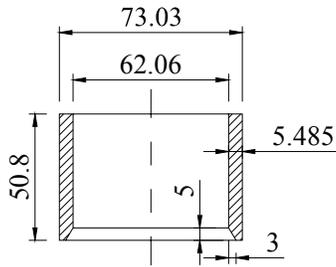


Base Aislador - Planta

Figura 4. Dimensiones de la base del aislador (Superficie deslizante)

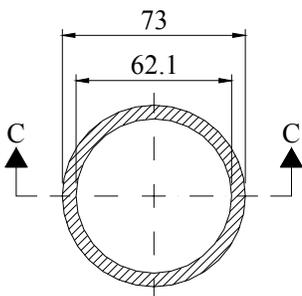
En las Figuras 4 a 7 se presentan las dimensiones de los elementos fabricados que componen el sistema de aislamiento. Cabe resaltar que se escogió un

conjunto de 4 aisladores para generar un sistema estable ante cargas laterales.



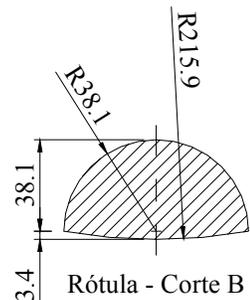
Tubo de Apoyo - Corte C

Nota:
Dimensiones en mm



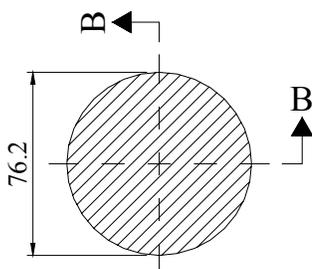
Tubo de Apoyo - Planta

Figura 5. Dimensiones del tubo de apoyo sobre rótula



Rótula - Corte B

Nota:
Dimensiones en mm



Rótula - Planta

Figura 6. Rótula que desliza sobre la base

Cantidades Adicionales

- 8 Angulos de 1"x1"x1/4" o menores de longitud 650 mm
- 16 Pernos roscados sin cabeza \emptyset - L=7" - 2 Tuercas por perno
- 16 Pernos roscados con cabeza \emptyset - L=3"

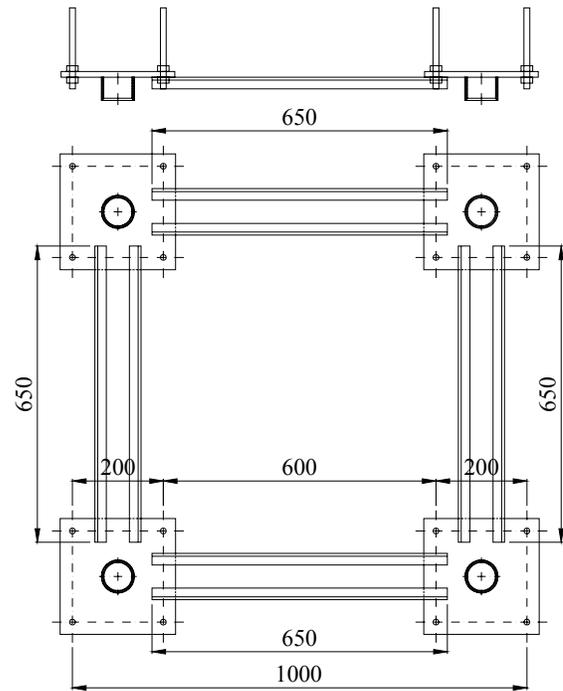


Figura 7. Sistema de amarre en cimentación

El primer modelo ensayado es un edificio tridimensional a escala 1:6, con una sola luz en cada dirección de longitud 80 cm y tres pisos con altura de 40 cm cada uno. La estructura tiene un peso total de 374 kgf, lo que resulta en una carga de 93.5 kgf por aislador. El periodo de vibración es de 0.29 seg ($F=3.44$ Hz) y el amortiguamiento estructural es del 1%. En las Figuras 8 a 13 se presenta el primer montaje realizado.



Figura 8. Detalle de la rótula y la base cóncava esférica



Figura 9. Vista general del montaje (4 aisladores)



Figura 10. Detalle Aislador – vista en alzado



Figura 11. Vista general – sistema de amarre sobre aisladores

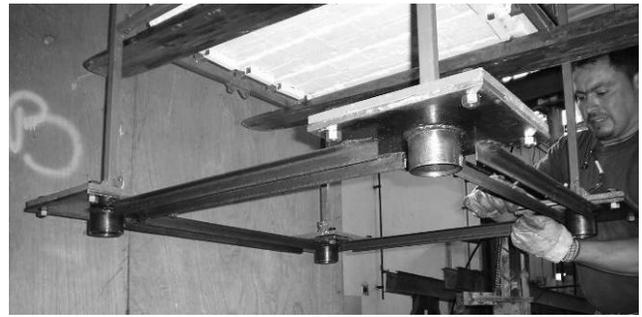


Figura 12. Unión del edificio al sistema de amarre de cimentación



Figura 13. Vista general del montaje

El segundo modelo experimental consiste en una placa de concreto de dimensiones 1.05 x 1.05 m y 0.20 m de espesor (ver Figuras 14 y 15). Las dimensiones de la placa se escogieron de tal forma que no se presentaran desplazamientos excesivos o que su peso no fuera tan grande que no se desplazara, hay que recordar que la rigidez es proporcional al peso sobre el aislador. El peso total de la placa es de 540 kgf, 135 kgf por aislador.

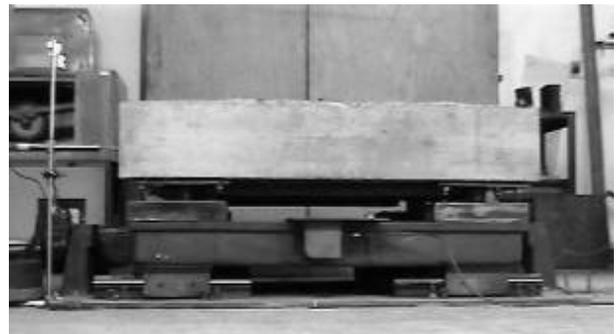


Figura 14. Vista en alzado – Placa de concreto



Figura 15. Vista general del ensayo con la placa de concreto

2.2 Carga Aplicada

Tanto para el edificio metálico como para la placa en concreto se utilizaron en total 13 señales de desplazamiento contra el tiempo, así:

- Barrido sinusoidal con frecuencias que varían entre 2.2 y 4.0 Hz y amplitudes entre 7 y 12.5 mm.
- Sismo Tauramena al 50%, 100% y 200%.
- Sismo México al 50%, 100% y 200%.
- Sismo El Centro al 50%, 100% y 200%.
- Sismo Corralitos al 50%, 100% y 200%.

Estas señales fueron escaladas en el tiempo por un factor de $1/\sqrt{6}$ teniendo en cuenta lo enunciado en el numeral 2.1 y la Tabla 1.

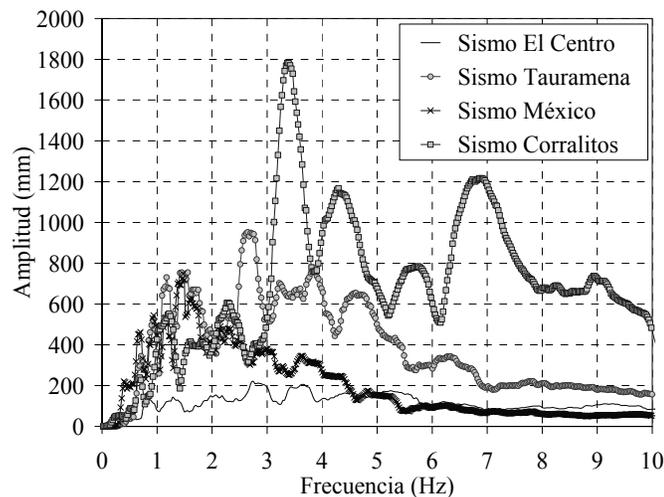


Figura 16. Espectros de Fourier de las señales de entrada

La Figura 16 presenta los espectros de Fourier para las señales de entrada aplicadas a los modelos experimentales. En la Tabla 2 se pueden observar las frecuencias características de estas señales.

Tabla 2. Frecuencias características de los espectros de Fourier

Sismo	Frec.	Frec.	Frec.	Frec.
	Hz	Hz	Hz	Hz
El Centro	2.75	3.65	5.26	4.54
México	1.47	1.63	0.94	1.16
Tauramena	2.65	3.82	1.56	1.17
Corralitos	3.37	6.74	4.3	5.76

3 ECUACIONES BASICAS DE LOS AISLADORES

3.1 Análisis Estático

En las ecuaciones presentadas a continuación se muestran los parámetros que definen el comportamiento de los aisladores tanto en análisis como en diseño formando parte de un sistema de resistencia sísmica y disipación de energía.

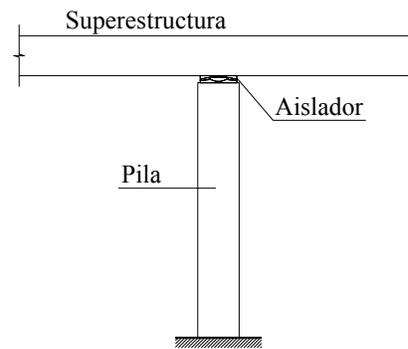


Figura 17. Posición de los aisladores en la estructura de un puente

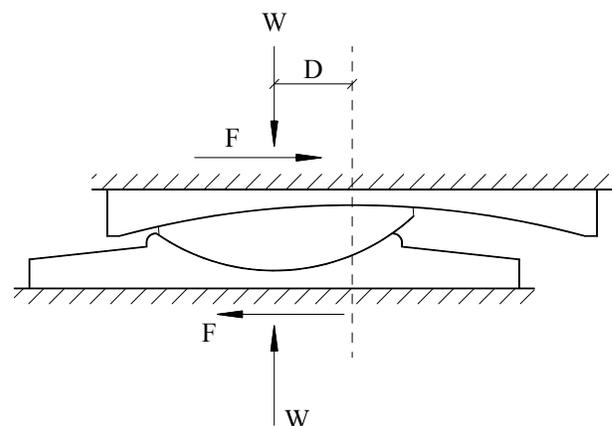


Figura 18. Deformada del FPS

Con base en las Figuras 18 y 19 se deducen las ecuaciones planteadas a continuación (Zayas et al., 1987):

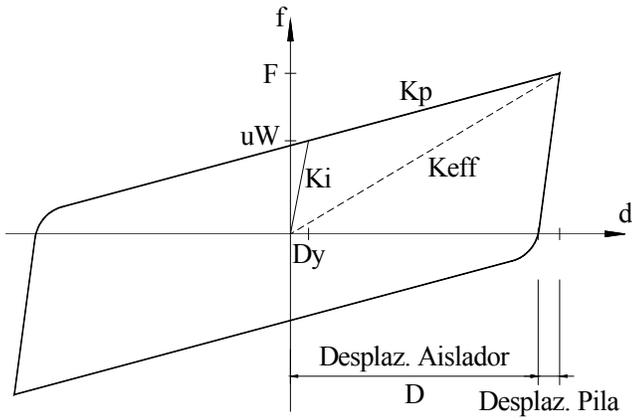


Figura 19. Ciclo de histéresis del aislador

- u = Fricción dinámica
- W = Carga vertical en el aislador
- R = Radio de curvatura
- Ki = Rigidez de la pila
- Kfps = Rigidez del aislador = W / R

$$\frac{1}{Kp} = \frac{1}{Ki} + \frac{1}{Kfps}$$

Si $Ki \gg Kfps$ se debe usar $Kp = Kfps$, es decir, la rigidez del sistema es la rigidez del aislador.

- D = Desplazamiento de diseño
- F = Fuerza en el aislador = $uW + \left[\frac{W}{R}\right]D$
- T = Periodo del aislador = $2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}$
- Keff = Rigidez efectiva = $\frac{F}{D}$
- Teff = Periodo efectivo = $2\pi\sqrt{\frac{W}{Keff * g}}$
- B = Amort. Efectivo = $\frac{2}{\pi} \left[\frac{u}{u + D/R} \right]$
- Dy = $\frac{uW}{Ki}$

En caso de que $Dy > 0.10$ pulg. Se debe utilizar $Dy = 0.10$ pulg.

3.2 Análisis Dinámico

El apoyo FPS es una forma de apoyo deslizante que consta de un patín articulado sobre una superficie esférica. En la Figura 20 se observa un diagrama de

cuerpo libre de un apoyo FPS de donde se puede derivar que la fuerza lateral F necesaria para producir un desplazamiento u está dada por:

$$F = \frac{W}{R \cos \theta} u + \frac{Ff}{\cos \theta} \quad (3)$$

donde W es la carga soportada por el apoyo, R es el radio de curvatura de la superficie esférica, Ff es la fuerza de fricción y θ es el ángulo de rotación. Como los apoyos se diseñan típicamente con una capacidad de desplazamiento $u < 0.2 R$, se tiene que $1/\cos \theta < 1.02$ sin error significativo, la ecuación (3) puede ser replanteada de la forma:

$$F = \frac{W^*}{R} u + \mu W^* Z \quad (4)$$

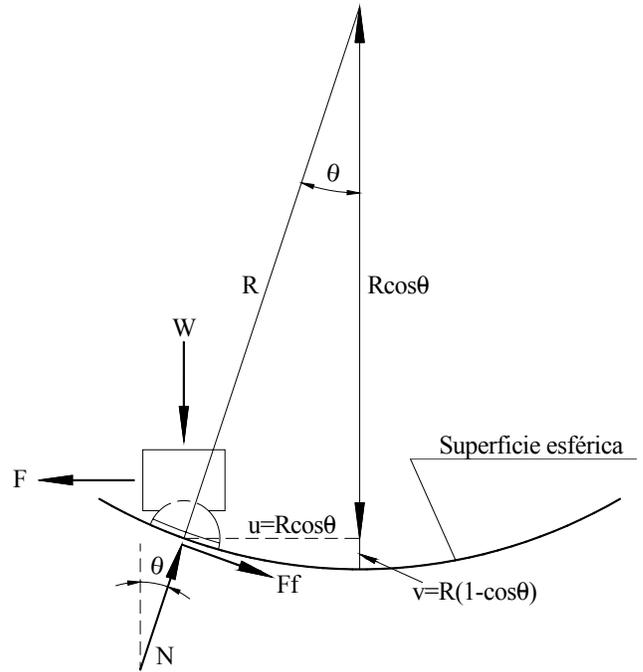


Figura 20. Diagrama de cuerpo libre

en la cual W^* representa la carga axial instantánea (incluye la carga gravitacional, los efectos del movimiento vertical del suelo y el momento de volcamiento), μ es el coeficiente de fricción dependiente de la velocidad y la presión y Z es una variable en el rango (-1,1), la cual depende de la dirección del vector de velocidad instantánea. En general, el coeficiente de fricción se puede describir como:

$$\mu = f_{máx} - (f_{máx} - f_{mín}) \exp(-a|\dot{u}|) \quad (5)$$

donde $f_{mín}$ es el coeficiente de fricción a velocidad cero de deslizamiento, $f_{máx}$ es el coeficiente de fricción a grandes velocidades de deslizamiento, \dot{u} es la

velocidad instantánea y a es un parámetro de ajuste de la curva de coeficiente de fricción vs velocidad de deslizamiento. En la ecuación (4) se observa una propiedad fundamental del aislador por péndulo de fricción (FPS). La fuerza lateral es directamente proporcional a la carga axial; esta propiedad minimiza la ocurrencia de movimientos torsionales no deseados. Igualmente, esta propiedad influye en la fluctuación de la carga lateral en presencia de aceleraciones verticales fuertes del terreno.

4 MODELACION ANALITICA

4.1 Software

Para la modelación analítica se utilizó el programa de análisis estructural SAP2000 v8, el cual trae entre su biblioteca de elementos con comportamiento no lineal, el elemento Friction Isolator (NLLink), con todos y cada uno de los parámetros requeridos para simular el funcionamiento del mismo como son la fricción estática y dinámica, el radio de curvatura y el parámetro de forma a , al igual que las rigideces efectivas en cada dirección (ver Figura 21).

El programa permite realizar análisis no lineales contra el tiempo concentrando la no linealidad en dichos elementos, igualmente, utiliza la ecuación desarrollada por Zayas et al., 1987, para el cálculo de la fuerza en el aislador con base en su deformación y velocidad.

Figura 21. Ejemplo entrada de datos para elemento Friction Isolator de SAP2000

4.2 Modelo Edificio

Para comparar los resultados de la fase experimental se realizó un modelo sencillo para análisis contra el

tiempo concentrando la no linealidad en los elementos NLLink de la base, la estructura metálica es lineal elástica. En la Figura 22 se muestran detalles del modelo.

A diferencia de la placa no se utilizó un modelo simplificado de un solo grado de libertad para tener en cuenta la influencia del momento de volcamiento en el comportamiento del sistema de aislamiento.



Figura 22. Vista general del modelo del edificio metálico

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las modelaciones analíticas.

Con respecto a las deformaciones y fuerzas en los aisladores se presenta la Figura 23, en la misma se puede definir un desplazamiento mínimo de 23 mm que corresponde a una fuerza de 21 kgf. Los máximos obtenidos corresponden a una deformación de aproximadamente 15 mm y una fuerza de 16 kgf. En la Figura 24 se observa claramente el fenómeno de resonancia el cual se acentúa a medida que la frecuencia de la señal se aproxima al periodo del sistema de aislamiento. En la medida en que aumenta la aceleración la resonancia se vuelve cada vez mayor. En la Figura 25 se incluyen las gráficas de desplazamientos para la estructura con base fija.

Las Figuras 24 y 25 se encuentran a la misma escala y se observa fácilmente la reducción en desplazamientos presentados como deriva. Tomando como ejemplo la frecuencia de 6 Hz en las dos figuras, se pasa de una deriva del 3.0% en la estructura con base fija a una deriva del 0.95% en la estructura con base aislada. Para este caso la estructura tiende a moverse como un cuerpo rígido a pesar de su alto grado de flexibilidad.

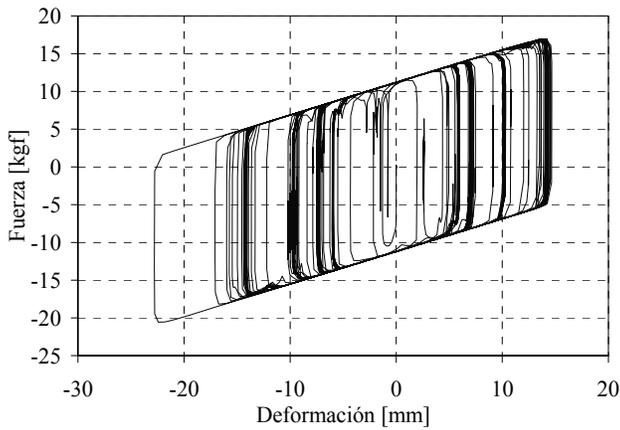


Figura 23. Barrido sinusoidal – Fuerza vs deformación obtenida en el modelo analítico

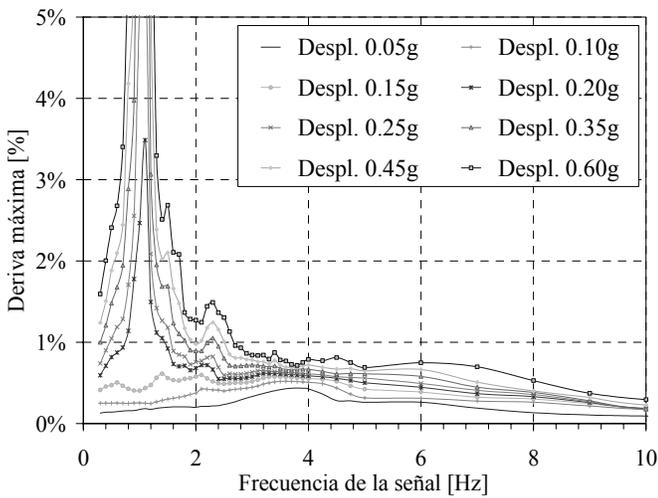


Figura 24. Barrido sinusoidal – Deriva máxima vs Frecuencia de la señal en el edificio aislado

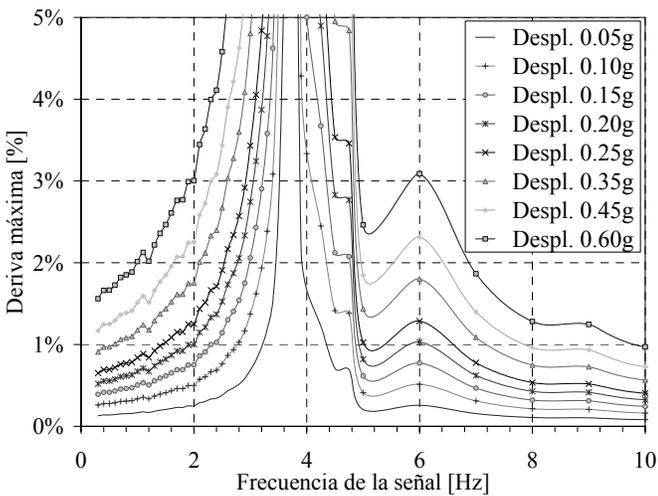


Figura 25. Barrido sinusoidal – Deriva máxima vs Frecuencia de la señal en el edificio con base fija

La Figura 26 presenta otra forma de ver el fenómeno de resonancia en la frecuencia del aislador como espectro de desplazamientos para el edificio aislado. Al comparar con la Figura 27 se observa la variación en el periodo estructural.

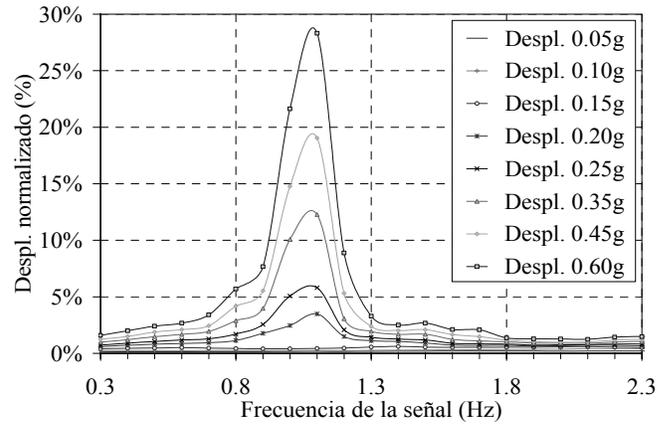


Figura 26. Barrido sinusoidal – Espectro de desplazamientos para el edificio aislado

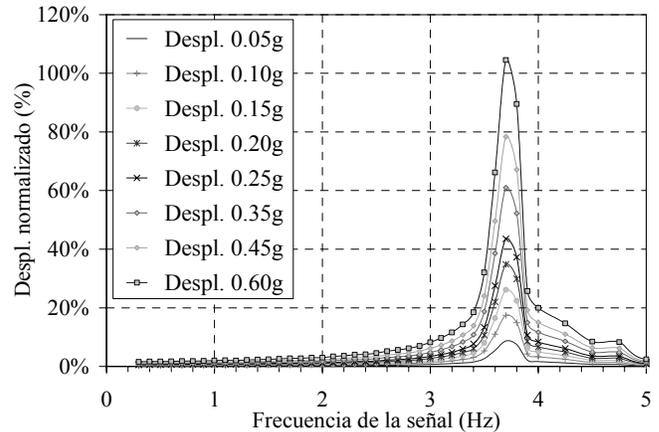


Figura 27. Barrido sinusoidal – Espectro de desplazamientos para edificio con base fija

4.3 Modelo Placa

Para la placa de concreto se realizaron dos modelos, uno simulando la placa con elementos finitos tipo shell (ver Figura 28) para poner el peso sobre los aisladores con el fin de calibrar un modelo más sencillo de un grado de libertad con un sólo aislador que requería un tiempo menor de proceso, los resultados presentados corresponden a este último modelo. En la placa de concreto se obtuvo un desplazamiento mínimo de 23 mm correspondiente a una fuerza de 31 kgf. Los máximos obtenidos fueron de 17 mm en desplazamiento y 27 kgf en fuerza en el aislador.



Figura 28. Detalle del modelo con elementos tipo shell

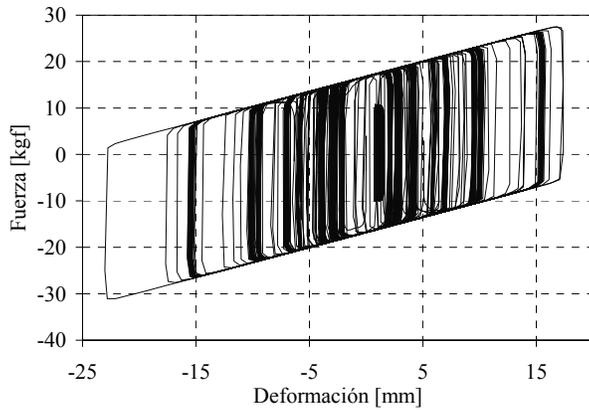


Figura 29. Barrido sinusoidal – Fuerza vs deformación obtenida en el modelo matemático

Como se observa en la Figura 30, para aceleraciones pequeñas (0.10g) la aceleración de la placa tiende a ser la aceleración de entrada, para aceleraciones mayores se presenta un efecto de resonancia en la frecuencia del aislador, se debe recordar que el periodo del aislador es de 0.93 seg. Para pequeñas aceleraciones la aceleración de la placa tiende a ser la aceleración de entrada, esto explica lo obtenido en la Figura 31 en la cual se observa que el desplazamiento relativo entre la placa y la base tiende a ser cero para estos rangos de aceleración.

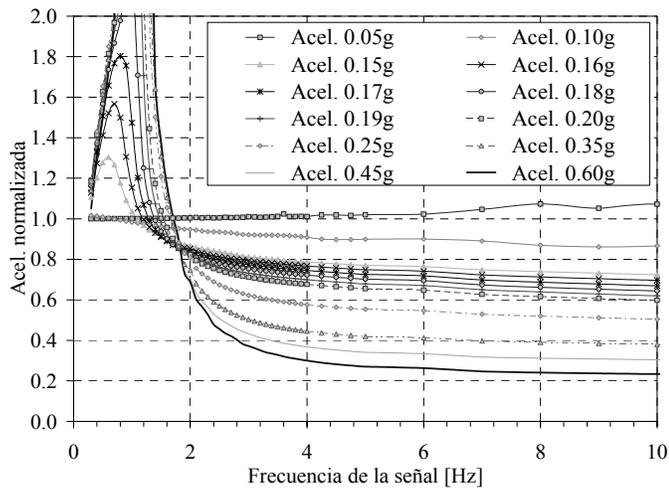


Figura 30. Barrido sinusoidal – Acel. normalizada (Acel. Placa / Acel. Mesa) vs Frec. de la señal para la placa aislada

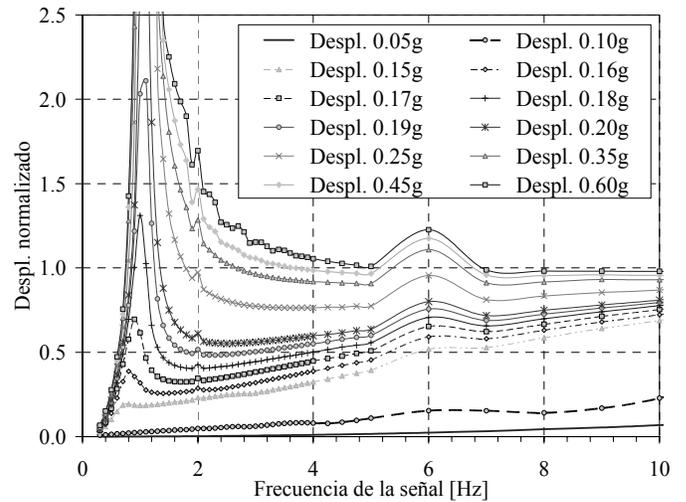


Figura 31. Barrido sinusoidal – Despl. normalizado (Despl. Placa / Despl. Mesa) vs Frec. de la señal para la placa aislada

5 ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Edificio Metálico

A continuación se presenta una de las figuras para el ensayo del edificio metálico a escala 1:6 en forma gráfica de fuerza vs desplazamiento en el aislador. En la Figura 32 se observa un desplazamiento mínimo de aprox. 22 mm y una fuerza mínima de 20 kgf. Los máximos corresponden a una deformación de 16 mm y una fuerza de 17 kgf.

Comparado con lo obtenido en el modelo analítico, el modelo experimental muestra una buena correlación, esto se debe en gran parte a que las condiciones del barrido sinusoidal son controladas y a que las propiedades del aislador dependen en gran parte de la física elemental.

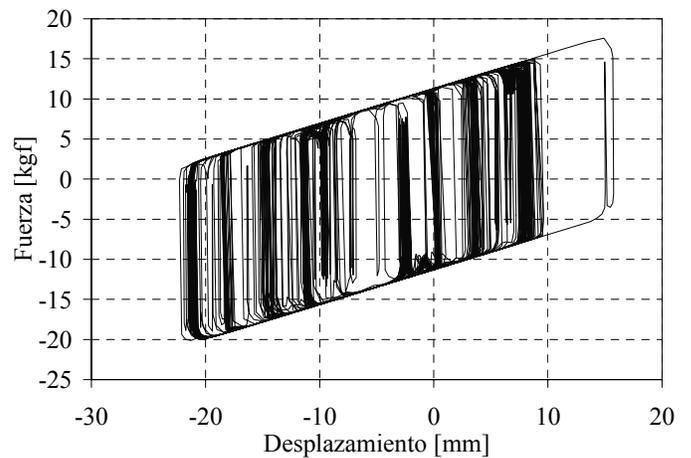


Figura 32. Barrido Sinusoidal – Diagrama de fuerza vs deformación en el aislador (ensayo Edificio)

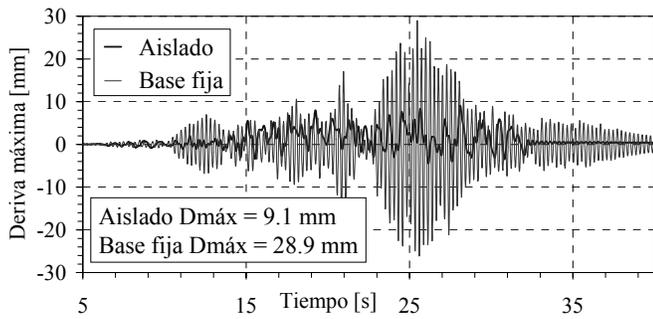


Figura 33. Sismo de Tauramena – Deriva máxima

En la Figura 33 se observa que para el sismo de Tauramena se presentó una reducción en la deriva de piso al 30% de la de base fija. Si se observa el espectro de Fourier se puede deducir que la estructura pasó de una máxima amplitud para la frecuencia con base fija (3.57 Hz) a una amplitud menor para la frecuencia con base aislada (1.43 Hz).

En los sismos de El Centro y México se obtuvieron respuestas similares al modelo de base fija. Observando nuevamente los espectros de Fourier se verifica que el cambio de frecuencias en el comportamiento de la estructura no implica un cambio significativo en las amplitudes en las señales.

En la Figura 36 se observa con mayor claridad el comportamiento del edificio metálico para cada uno de los sismos en estudio.

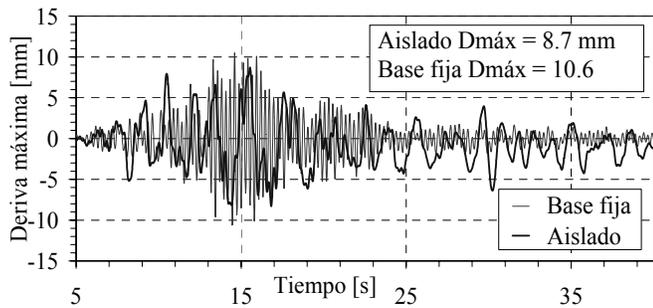


Figura 34. Sismo de México – Deriva máxima

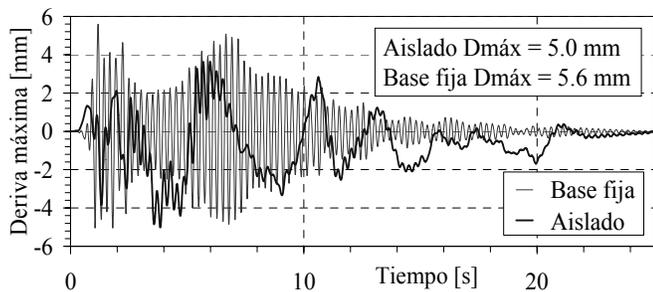


Figura 35. Sismo El Centro – Deriva máxima

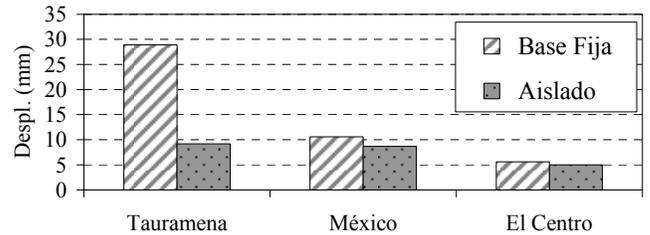


Figura 36. Comparación de aceleraciones obtenidas en el modelo experimental para diferentes sismos – Edificio Metálico

5.2 Placa de concreto

Los resultados obtenidos en la placa y presentados en las Figuras 37 a 49 muestran las relaciones fuerza vs deformación en el aislador y el comparativo de las aceleraciones medidas tanto en la mesa vibratoria como en la placa de concreto. Se observa una reducción de hasta tres veces en la aceleración medida en la placa vs la aceleración de entrada en la base.

De la Figura 37 se puede determinar una deformación mínima en el aislador de 22 mm y una fuerza mínima de 30 kgf. Los máximos corresponden a 14.5 mm de deformación y 25 kgf de fuerza en el aislador, al igual que el edificio metálico la placa también presenta una buena correlación.

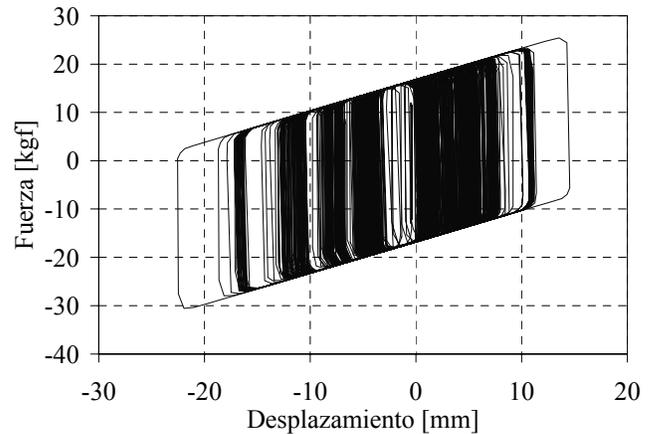


Figura 37. Barrido Sinusoidal – Diagrama de fuerza vs deformación en el aislador (ensayo Placa)

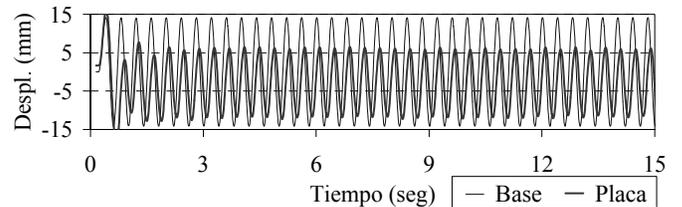


Figura 38. Barrido Sinusoidal – Desplazamientos para frecuencia de 2.5 Hz y amplitud 14.2 mm

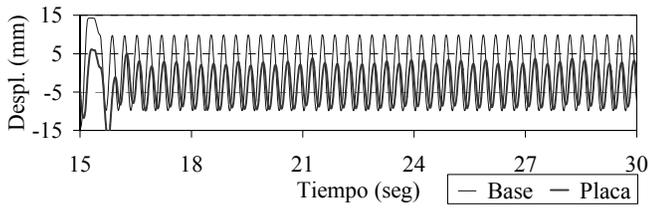


Figura 39. Barrido Sinusoidal – Desplazamientos para frecuencia de 3.0 Hz y amplitud 10 mm

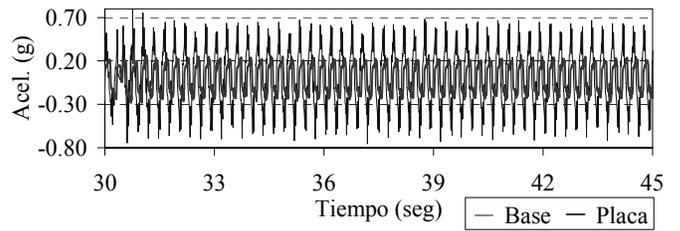


Figura 44. Barrido Sinusoidal – Aceleraciones para frecuencia de 3.5 Hz y amplitud 9.3 mm

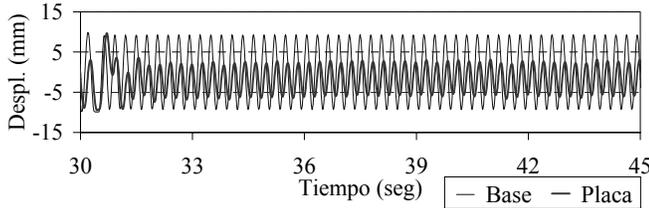


Figura 40. Barrido Sinusoidal – Desplazamientos para frecuencia de 3.5 Hz y amplitud 9.3 mm

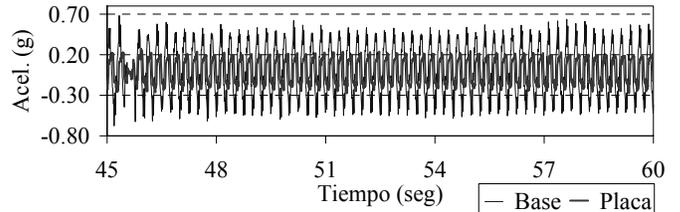


Figura 45. Barrido Sinusoidal – Aceleraciones para frecuencia de 4.0 Hz y amplitud 7.1 mm

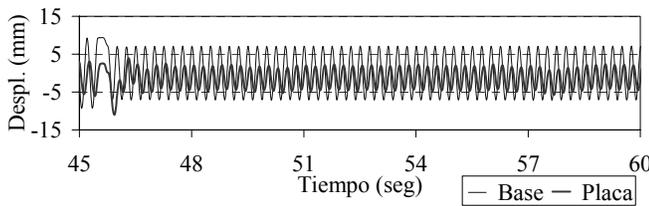


Figura 41. Barrido Sinusoidal – Desplazamientos para frecuencia de 4.0 Hz y amplitud 7.1 mm

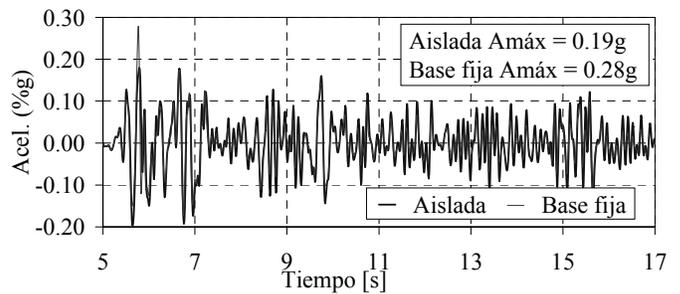


Figura 46. Sismo de Tauramena – Aceleraciones obtenidas

En la Figura 46 se observa que para el sismo de Tauramena se presentó una reducción en la aceleración al 60% de la de base fija. Cabe resaltar que en este caso la frecuencia del sistema es la frecuencia del aislador (1.07 Hz).

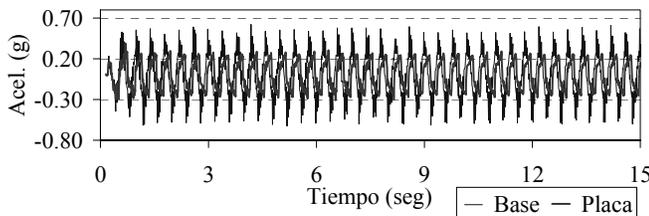


Figura 42. Barrido Sinusoidal – Aceleraciones para frecuencia de 2.5 Hz y amplitud 14.2 mm

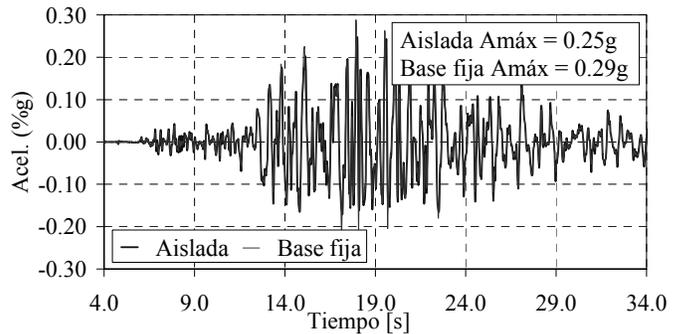


Figura 47. Sismo de México – Aceleraciones obtenidas

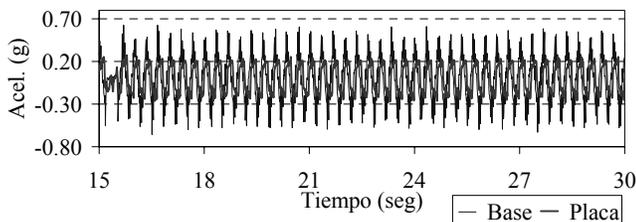


Figura 43. Barrido Sinusoidal – Aceleraciones para frecuencia de 3.0 Hz y amplitud 10 mm

Para el sismo de Corralitos (Figura 48) la aceleración se redujo al 40% del valor de la aceleración máxima del sismo de entrada. Con el sismo de México (Figura 47) se obtuvieron respuestas similares al modelo de base fija. En la Figura 49 se observa con mayor claridad el comportamiento de la placa de concreto para cada uno de los sismos en estudio.

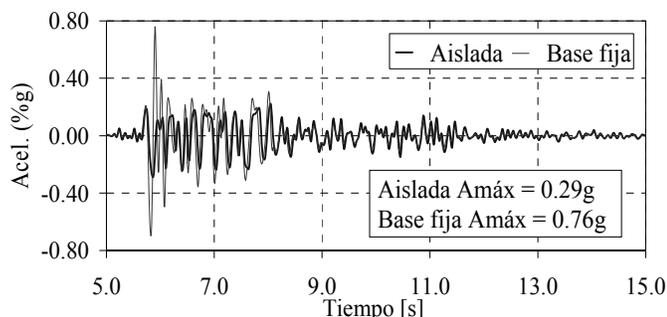


Figura 48. Sismo de Corralitos – Aceleraciones obtenidas

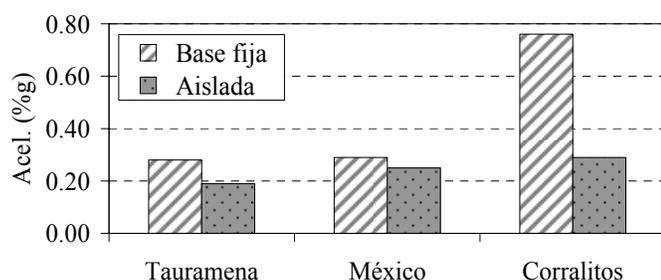


Figura 49. Comparación de aceleraciones obtenidas en el modelo experimental para diferentes sismos – Placa de concreto

6 CONCLUSIONES

Los modelos experimentales reflejan el comportamiento esperado de una estructura con aislamiento sísmico en su base presentando reducciones hasta en un 300% en los niveles de aceleración. Sin embargo, esta disminución puede variar significativamente dependiendo de la frecuencia de la señal de entrada. No en todos los casos este sistema funcionaría eficientemente.

Las ecuaciones planteadas expresan de manera acertada las relaciones fuerza vs deformación de los aisladores.

El grado de aproximación obtenido se debe en gran parte a las propiedades que intervienen en los sistemas de aislamiento FPS como son la gravedad y la fricción.

En la mayoría de los casos, los modelos de un solo grado de libertad expresan de manera confiable el comportamiento de estructuras diseñadas o rehabilitadas con esta clase de dispositivos.

Los ciclos de histéresis generan un amortiguamiento adicional en el sistema y por tanto una reducción en la demanda sísmica.

Las aceleraciones verticales fuertes pueden generar fluctuaciones en la carga lateral soportada por los aisladores hasta presentar la falla del dispositivo, por esta razón, pueden combinarse ya sea con topes de desplazamiento vertical, contrapesos o amortiguadores entre otros. El comportamiento de estos dispositivos ante aceleraciones verticales es una fuente de incertidumbre que debe ser adecuadamente estudiada en futuras investigaciones.

7 REFERENCIAS

- Constantinou, M.C., Tsopelas, P., Kim, Y.S., & Okamoto, S. 1993. NCEER – Taipei Corporation research program on sliding seismic isolation system for bridges – *Experimental and analytical study of friction pendulum system (FPS)*. Report No. NCEER 93-0020, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, NY, 1993.
- Chopra, A.K. 2000. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Habibullah, A. 2000. *Structural Analysis Program – SAP2000 – Analysis Reference Manual*. Computers & Structures Inc. California.
- Harris, H.G. & Sabnis G.M. 1999. *Structural Modeling and Experimental Techniques*. CRC Press. Segunda Edición. New York, USA.
- Kelly, T.E. 2001. *Base isolation of Structures: Design Guidelines*. Holmes Consulting Group Ltd.
- Mokha, A., Constantinou M.C., Reinhorn, A.M. & Zayas, A.V. 1991. Experimental study of friction pendulum isolation system, *Journal of Structural Engineering*. ASCE 117, 1201-1217.
- Naeim, F. & Kelly, J.M. 1999. *Design of seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons Inc.
- Skinner, R.I. & McVerry, G.H. 1993. *An Introduction to Seismic Isolation*. John Wiley & Sons Inc.
- Tsopelas, P. & Constantinou, M.C. 1996. Experimental Study of FPS System in Bridge Seismic Isolation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 25, 65-78. John Wiley & Sons Inc.
- Wilson, E.L. 2000. *Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*. Computers & Structures Inc. California.
- Zayas, V.A., Low, S.S. & Marin, S.A. 1981. *The FPS earthquake resisting systems, experimental reports*. Report No. 81-01, University of California Berkeley, California.
- Zayas, V.A. Earthquake Protection Systems. *Friction Pendulum Bearings*. www.earthquakeprotection.com.