



Estudio experimental de un nuevo dispositivo de aislación sísmica implementado en modelos de estructuras a escala

P. Silva Inalaf¹, N. Maureira Carsalade² y C. Oyarzo Vera³

RESUMEN

En esta investigación se evalúa experimentalmente el desempeño estructural de un nuevo dispositivo de aislación sísmica instalado en un set de modelos de edificios a escala. El dispositivo ha sido ideado previamente por el grupo de investigadores y permite vincular a la superestructura con la subestructura proporcionando rigidez lateral elástica y elevada resistencia a carga axial. Se realizaron numerosos ensayos dinámicos con el objetivo de verificar el adecuado desempeño del dispositivo propuesto y su capacidad para mejorar el comportamiento estructural en términos de reducción de la respuesta.

Los resultados demuestran que el dispositivo propuesto funciona correctamente en las estructuras probadas. Se verificó a la vez el comportamiento de cuerpo rígido de la superestructura, concentrando el desplazamiento impuesto por el sismo simulado en la base de aislamiento. No se presentaron problemas de levantamiento localizados en los aisladores y se registró reducción de las aceleraciones de piso hasta en un 65%, comparado con diseños convencionales. Por lo tanto, se puede afirmar que este dispositivo tiene el potencial para ser utilizado en estructuras rectangulares de hasta 24 pisos, con esbeltez de hasta 6.

Los resultados de esta investigación mostraron la gran resistencia a carga axial de compresión y tracción del dispositivo de aislamiento así como su estabilidad lateral, la cual es independiente del nivel de carga axial. Por lo tanto, se puede concluir que el dispositivo propuesto tiene el potencial de permitir extender el uso de la tecnología de aislamiento sísmico en forma segura a edificios más altos y/o esbeltos que en la actualidad.

PALABRAS CLAVE: Aislación sísmica; edificios altos y esbeltos; resistencia a tracción.

ABSTRACT

In this research, the structural performance of a new seismic isolation device installed in a set of scaled models is experimentally evaluated. The conceptual idea of the device has been previously developed by the group of researchers. The device allows to link the superstructure with the substructure providing elastic lateral stiffness and high resistance to axial load. Numerous dynamic tests were carried out in order to verify the adequate performance of the proposed device and its capacity to improve the structural behavior in terms of reduction of its response.

The results show that the proposed device works well in tested structures. At the same time, the rigid body behavior of the superstructure was verified, concentrating the displacement imposed by the simulated earthquake on the base of isolation. There were no localized uplifting problems in the isolators and there was a reduction of the floor accelerations up to 65% compared to conventional

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, psilva@ing.ucsc.cl

² Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, nmaureira@ucsc.cl

³ Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, coyarzov@ucsc.cl



designs. Therefore, it can be affirmed that this device has the potential to be used in rectangular structures up to 24 floors, and slenderness up to 6.

The results of this research showed the great resistance to axial load of compression and traction of the isolation device as well as its lateral stability, which was probed to be independent of the level of axial load. Therefore, it can be concluded that the proposed device has the potential to extend the use of seismic isolation technology safely to higher and/or slender buildings than at present.

KEYWORDS: Base isolation; high and slender buildings; traction resistance.

1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos sísmicos representan un peligro potencial para las estructuras, causándoles daños permanentes tanto en las cimentaciones como en la superestructura, llegando en algunos casos incluso al colapso de ésta. Como forma de disminuir estos daños, se han implementado nuevas tecnologías de protección sísmica en el diseño sismorresistente de estructuras. Los sistemas de aislamiento basal son uno de los métodos más exitosos y ampliamente aplicados para mitigar las vibraciones estructurales y daños durante eventos sísmicos (Johnson et al, 1998).

El diseño de estructuras con aislación sísmica basal se fundamenta en el principio de desacoplar la estructura del suelo en el dominio de la frecuencia, mediante la adición de una interface muy flexible en comparación con la estructura que se desea proteger. Esta interface flexible absorbe la mayor parte de los desplazamientos perjudiciales que el sismo impone, reduciendo sustancialmente la deformación y por tanto las sollicitaciones internas en la superestructura (Kelly, 1991). En consecuencia, la implementación de estos sistemas de aislación basal permite minimizar considerablemente el daño estructural y mantener las funciones de los edificios incluso después de someterse a terremotos de gran intensidad. Adicionalmente, esta tecnología puede reducir significativamente las aceleraciones absolutas percibidas en la estructura, en comparación con aquellas registradas en el suelo de fundación o en una estructura gemela que no tenga implementado aislamiento sísmico (Kelly, 1991). Esto último se relaciona directamente con la percepción del terremoto que tienen los ocupantes, logrando que éste sea percibido con menor intensidad, redundando en mayor confort y menos pánico para los ocupantes en casos extremos. La reducción de las aceleraciones de piso también reduce el potencial daño a equipos y maquinaria inmobiliaria dentro del edificio protegido con aislamiento sísmico (Kelly, 1993).

El aislamiento sísmico de base ha sido ampliamente aceptado como una estrategia de diseño para edificios rígidos y de baja altura. Sin embargo, la extensión de esta técnica a edificios de mediana altura presenta una serie de problemas no resueltos. Un edificio de mediana altura, incluso cuando se aísla sísmicamente, podría potencialmente estar sometido a momentos volcantes que podrían provocar el levantamiento de algunos aisladores (Griffith et al 1990). Esto no implica necesariamente que la estructura se separe de sus fundaciones o que exista rotura del dispositivo de aislamiento, sino que este último debe ser capaz de resistir la fuerza de tracción impuesta para lograr que la estructura se mantenga estable. Este fenómeno de levantamiento en los dispositivos, se conoce como “uplift” y está directamente relacionado con la esbeltez de la estructura. Mientras más esbelto sea un edificio, mayor será la probabilidad de alcanzar perjudiciales esfuerzos de tracción en los dispositivos de aislamiento (Komuro et al 2005). Eventualmente, el levantamiento en los dispositivos podría cambiar el comportamiento oscilante de la estructura, modificando perjudicialmente su respuesta. En la medida de que el edificio es más alto, el período de vibración vertical aumenta y su efecto comienza a ser percibido en la respuesta estructural del sistema sometido a una excitación dinámica como el sismo. Este último efecto es llamado “rocking” en la literatura especializada, y corresponde al



movimiento de oscilación o rotación del edificio en torno al nivel de aislamiento (Kelly, 1993). El rocking incrementa los desplazamientos laterales de piso, las aceleraciones y las deformaciones en la superestructura, teniendo por consecuencia un incremento en las sollicitaciones internas, pudiendo llegar incluso al daño estructural. Al idear un método que permitiera a los aisladores resistir la tensión, la técnica de aislamiento podría extenderse a edificios con un número mayor de pisos que los contemplados hasta ahora, siempre que la superestructura sea suficientemente rígida (Griffith et al. 1990).

En este estudio se evalúa experimentalmente el desempeño estructural de un nuevo dispositivo de aislación sísmica propuesto por los autores, cuyos estudios preliminares indican que tiene el potencial suficiente para resolver los problemas clásicos de resistencia a la tracción e inestabilidad que se presentan habitualmente en los dispositivos de aislación elastoméricos. Con este propósito, se confeccionaron tres modelos a escala 1:25 de edificios de planta cuadrada idéntica pero diferentes altura. Estos fueron aislados con un set de nueve modelos a escala del dispositivo propuesto, instalados en una grilla cuadrada. Estos modelos se sometieron a numerosos ensayos dinámicos en el laboratorio de estructuras de la UCSC, para los cuales se utilizó una mesa vibradora capaz de generar movimientos armónicos unidireccionales de distinta frecuencia. Estas pruebas permitieron establecer, a través de un análisis visual, que efectivamente los modelos estructurales propuestos no presentaron problemas de levantamiento ni rotación en torno al nivel de aislamiento.

A través de estas pruebas también fue posible evaluar la capacidad del dispositivo para controlar las aceleraciones de entrepiso que se producen en la estructura. Este resultado se vio reflejado claramente en la reducción de la respuesta en los modelos de estructuras aisladas en comparación con los modelos sin aislamiento sísmico implementado. Con este propósito se utilizaron instrumentos de medición que permiten obtener las aceleraciones de pisos a través de una señal de respuesta en función del tiempo. Los resultados obtenidos mediante estos ensayos indican que el dispositivo de aislamiento sísmico es capaz de reducir las aceleraciones de piso hasta en un 65%, comparado con diseños convencionales, verificándose a la vez el comportamiento de cuerpo rígido de la superestructura, concentrando el desplazamiento en la base. Adicionalmente, se extiende este estudio para determinar las formas y masas modales de cada estructura.

En base a los resultados obtenidos, se puede asegurar a través de esta investigación que el dispositivo propuesto tiene el potencial de permitir extender el uso de la tecnología de aislamiento sísmico en forma segura a edificios más altos y/o esbeltos que en la actualidad.

2. METODOLOGÍA

En esta investigación se evalúa experimentalmente un nuevo dispositivo de aislamiento sísmico propuesto, que vincula la superestructura a la subestructura mediante un mecanismo con forma de paraguas. Este es verticalmente muy rígido y es capaz de rotar con respecto a su punto de apoyo pivoteado en la base, permitiendo el desplazamiento lateral de la superestructura que rueda sobre él. El dispositivo cuenta con un cable en su interior, el cual proporciona una carga de pos-tensado al sistema de aislación. Este impone una tensión inicial para evitar que la superestructura sufra levantamiento al someterse a los efectos del sismo vertical y momento volcante, junto con proporcionar capacidad restitutiva al desplazamiento lateral o rigidez lateral. Este dispositivo fue evaluado de forma analítica en estudios preliminares (Toledo et al, 2017). El objetivo de dicha investigación fue verificar mediante un análisis paramétrico que el dispositivo es capaz de resolver los problemas de resistencia a la tracción e inestabilidad que se presentan comúnmente en los aisladores elastoméricos. Fue indispensable para ello plantear las relaciones constitutivas que vinculan la fuerza vs desplazamiento que gobiernan el comportamiento del dispositivo en estudio.



Dichas relaciones se formularon en base a hipótesis de simplificación, por lo que en una etapa posterior se realizó un estudio experimental para validar el modelo teórico por medio de ensayos dinámicos de laboratorio (Carrasco et al, 2017). Los resultados de este último estudio mostraron que las ecuaciones predicen adecuadamente el comportamiento mecánico del dispositivo.

En este documento se describen las pruebas y análisis experimentales realizados al dispositivo propuesto, con el fin de evaluar su desempeño estructural ante movimientos sísmicos. Para ello, se implementaron modelos a escala del dispositivo (Figura 1) en tres tipos de edificios, los cuales se diferencian en la altura, manteniendo fija su relación largo/ancho de la planta del edificio (razón de aspecto).



Figura 1: Dispositivo de aislación sísmica propuesto Esc. (1:25).

Para evaluar el desempeño estructural del dispositivo, se realizaron numerosos ensayos dinámicos en el laboratorio de estructuras de la UCSC, utilizando una mesa vibradora (Figura 2), que cuenta con una plataforma móvil capaz de realizar movimientos horizontales mediante la aplicación de un input. El funcionamiento de esta mesa vibradora está accionado por un motor eléctrico y un regulador de voltaje que permiten generar movimientos armónicos unidireccionales de distintas frecuencias. Los ensayos se realizaron tanto para maquetas con base fija como para maquetas aisladas, variando la intensidad del movimiento, aumentando el voltaje de entrada al motor de 2 en 2% llegando hasta el 50% de su capacidad.

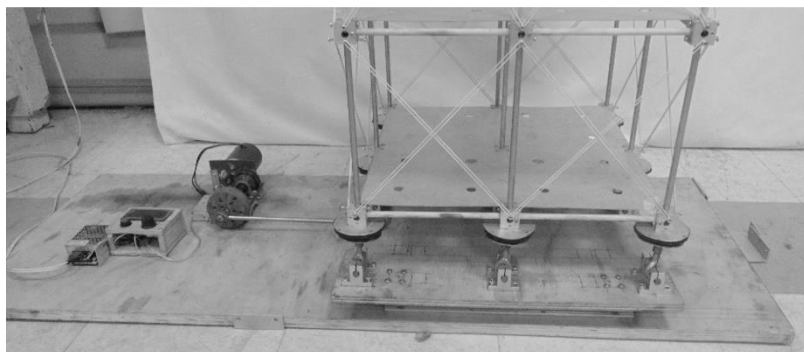


Figura 2: Maqueta aislada en mesa vibradora.

Los ensayos realizados permitieron evidenciar de forma visual la existencia o no de problemas de levantamiento y/o rotación local que se podrían generar eventualmente en los dispositivos propuestos. Además, permitió evaluar la capacidad del dispositivo de controlar las vibraciones de pisos a través de un análisis comparativo de los resultados obtenidos para maquetas con y sin aislamiento sísmico.



Esto permitió evidenciar los beneficios de implementar estos sistemas de protección sísmica en términos de reducción en la respuesta de la estructura.

2.1 Modelos estructurales

Teniendo en cuenta que una de los principales inconvenientes en la implementación de aislación sísmica de base es la altura y esbeltez de los edificios, se construyeron tres maquetas estructurales (Tabla 1), para representar edificios con distintas esbelteces y evaluar el desempeño del dispositivo propuesto en ellas. Estas maquetas se confeccionaron en base a escalas de reducción calculadas de acuerdo a los parámetros dinámicos que vinculan la relación entre masa [M] y rigidez [K], considerándose para este propósito, una escala de reducción geométrica de (1:25) y una escala de densidad reducida de (1:10).

Tabla 1: Características estructurales de cada maqueta

Maqueta	Pisos	Altura [cm]	Esbeltez
1	12	120	3
2	18	180	4,5
3	24	240	6

Las maquetas construidas para este estudio (Figura 3), consisten en un sistema de pórticos compuesto por tres marcos resistentes en cada dirección. Las columnas que constituyen el primer piso están representadas por elementos cilíndricos huecos de aluminio de 8 mm de diámetro, que tiene un largo correspondiente a 25 cm y las columnas para los pisos superiores son representadas por elementos cilíndricos macizos de bambú del mismo diámetro y 30 cm de longitud. Esta diferencia se debe a que era necesario contar con un primer piso de columnas tubulares en donde poder instalar el elemento postensado que proporciona la rigidez lateral y resistencia a tracción al dispositivo. Análogamente para los elementos resistentes horizontales (vigas), se utilizaron los mismos cilindros de bambú pero con un largo correspondiente a 20 cm. Las losas de pisos fueron caracterizadas con láminas cuadradas de zinc-alum de 0.35 mm de espesor, y 40 cm por lado. Dadas las características de este material se pueden considerar las losas como diafragmas de piso, pues tiene la rigidez y resistencia suficiente para lograr la distribución de fuerzas a los elementos resistentes verticales. Sin embargo, debido a su pequeño grosor, su resistencia a flexión se consideró despreciable frente a la proporcionada por los elementos de viga.

Con el propósito de conectar los elementos estructurales que componen la maqueta, se diseñaron uniones de aluminio especiales. Estas conexiones (Figura 4) corresponden a cubos metálicos de 2.5 cm de arista, los cuales cuentan con orificios perfectamente alienados para ser ajustados a los elementos estructurales. Estos elementos conectores tiene una importancia fundamental ya que, además de permitir la continuidad estructural, permiten materializar uniones rígidas en la estructura. Se utilizaron bandas de goma dispuestas concéntricamente en forma de cruz, para arriostrar el sistema de pórticos y proporcionar mayor rigidez a la estructura. Esto último fue requerido para alcanzar la rigidez escalada del edificio real que se buscó caracterizar.

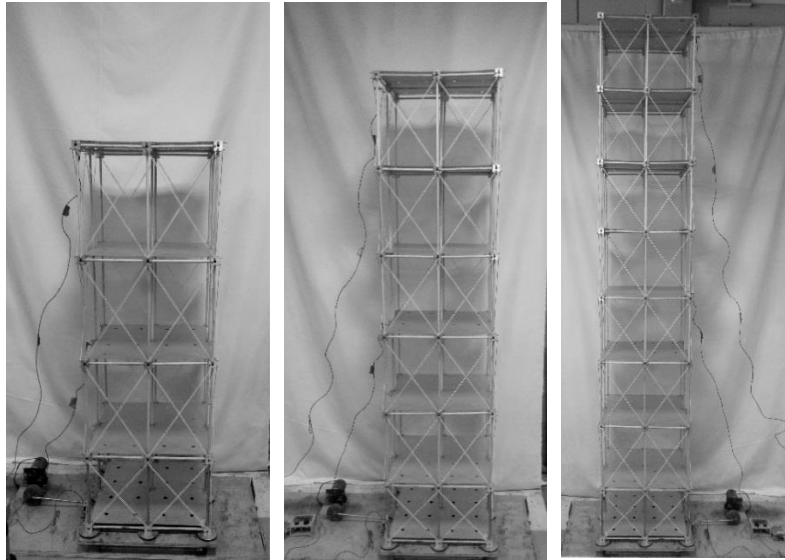


Figura 3: De izquierda a derecha: modelos que simulan edificios de 12, 18, y 24 pisos.

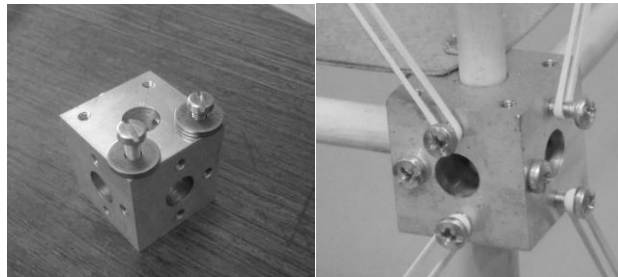


Figura 4: Conexiones rígidas de aluminio.

Inicialmente se caracterizaron las maquetas construidas con el objetivo de obtener el periodo fundamental de la estructura de forma aproximada. Para ello, se estimó que el periodo natural de cada estructura real se puede obtener de forma aproximada mediante la siguiente expresión:

$$T_n = \frac{N_p}{10} \quad (1)$$

Donde N_p es el número de pisos y T_n (s) es el periodo natural de la estructura.

2.2 Sistema de aislación

El sistema de aislación (Figura 5), implementado en los modelos estructurales, está compuesto por un set de 9 modelos a escala 1:25 del dispositivo propuesto, distanciados cada 20 cm. Sobre cada aislador se ubica una goma de 4 mm de espesor que tiene como función permitir la rodadura del dispositivo sin que este se deslice, además de distribuir la carga vertical en un área finita y no concentrada puntualmente. De igual manera, sobre cada goma se encuentra una lámina de aluminio circular de 1.5mm de grosor, la cual es suficientemente rígida y resistente para evitar deformaciones y mantener horizontal el plano de apoyo del aislador con la superestructura.

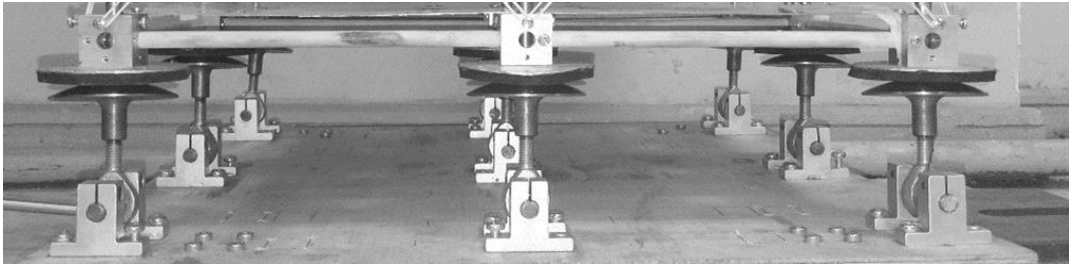


Figura 5: Sistema de aislación propuesto implementado en una maqueta

El periodo asociado al sistema de aislación está condicionado principalmente por el primer piso de la estructura, ya que como se mencionó anteriormente, este se encuentra construido de manera diferente. En ese piso las columnas están compuestas por elementos cilíndricos huecos que en su interior contienen tiras de goma de hule de 10 cm de longitud. Estas tiras de goma, se encuentran tensionadas adecuadamente, con el propósito de evitar que la superestructura sufra levantamiento al someterse a la acción sísmica, junto con proporcionar capacidad restitutiva y rigidez lateral al sistema de aislación. Se realizaron ensayos previos de resistencia a la tensión al caucho utilizado, verificándose que las tiras de goma fuesen apropiadas para generar la tensión requerida al sistema sin deformarse permanentemente ni romperse. Dicho ensayo indico que este material se puede estirar hasta un 250% sin sufrir deformaciones permanentes, alcanzando una resistencia de 34,6 kg/cm², con lo que se determinó que el módulo de elasticidad secante de la goma es $E_{sec}=15$ kg/cm². Por lo tanto, es suficientemente elástico y resistente para reproducir los efectos requeridos en el sistema.

Con el propósito de determinar la tensión requerida a la que deben estar sometidas las tiras de goma en el sistema de aislación, se determinó el periodo de aislación mínimo requerido para cada maqueta. Donde, para estructuras bajas y poco esbeltas ($\lambda \leq 3$) se consideró la siguiente expresión, basada en el espectro de diseño elástico de aceleraciones.

$$T_a^{mín} = \max \{ 3 \cdot T_1^{(s.e.)}, 3(s) \} \quad (2)$$

Análogamente, para estructuras altas y esbeltas ($\lambda > 3$)

$$T_a^{mín} = \max \{ 2.5 \cdot T_1^{(s.e.)}, 3(s) \} \quad (3)$$

Donde $T_a^{mín}$ es el mínimo período de aislamiento considerado y $T_1^{(s.e.)}$ es el período fundamental de la estructura fija en su base.

Considerando lo anterior, el periodo de aislamiento asociado a las características de cada maqueta se determinó mediante la siguiente expresión:

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{mt}{9K_a}} \quad (4)$$

Donde T_a es el período de aislamiento asignado, m , la masa total sobre el nivel de aislamiento y k_a la rigidez lateral de cada uno de los 9 aisladores instalados en la base.

La rigidez de los aisladores, k_a , está asociada a la fuerza restitutiva F_s del dispositivo. Esta expresión fue extraída de la tesis de investigación de Toledo et al. (2017) y relaciona los parámetros involucrados en el comportamiento del dispositivo. En consecuencia, la rigidez del dispositivo se determinara calculando el siguiente límite:

$$k_a = \lim_{u \rightarrow 0} \frac{F_s(u)}{u} = \frac{T_0}{H} \quad (5)$$



Donde T_0 es la tensión inicial del elemento postensado en el interior del aislador y H es la altura del mismo.

El estudio de Toledo et al. (2017) indica que para favorecer la capacidad resistente a tracción del dispositivo y evitar el levantamiento, la altura de este se debe ser igual a su radio de curvatura. Por lo tanto, la altura a la que se ajustará el dispositivo corresponde a 63 mm. Luego, reemplazando la Ec. (5) en Ec. (4) y desarrollando la expresión, se obtiene que la tensión a la que debe ser estirada la goma en el interior del aislador, la cual está dada por:

$$T_0 = \left(\frac{4\pi^2 mt}{9T_a^2} \right) H \quad (6)$$

Para las maquetas en estudio, se determinó que una tensión de 3 Newton es suficiente para que los aisladores tengan capacidad autocentrante y se evite el efecto de levantamiento en los dispositivos. Por lo tanto, fue necesario estirar las tiras de goma de hule 6 cm ($\epsilon=122\%$) para alcanzar la tensión deseada. En Tabla 2 se muestran las propiedades estructurales para cada maqueta, obtenidas mediante las ecuaciones mencionadas.

Tabla 2: Propiedades estructurales de cada maqueta.

Maqueta	T_n [s]	m_t [kg]	T_a [s]
1	0.24	5.5	0.72
2	0.36	7.5	0.9
3	0.48	9.5	1.2

2.3 Desempeño estructural del dispositivo

El dispositivo propuesto en esta investigación busca resolver las dos grandes problemáticas asociadas a los clásicos aisladores de goma, esto es, inestabilidad lateral y escasa resistencia a tracción. Lo anterior con el propósito de extender el uso de la tecnología de aislación basal a edificios más altos y/o esbeltos que en la actualidad. Uno de los principales problemas asociados a los aisladores de goma y que limita en mayor proporción la construcción de edificios de esas características con aislación sísmica de base, es el efecto de levantamiento o “uplift” que se produce de forma local en los dispositivos. Este fenómeno se genera debido a las fuerzas de tracción que impone el momento sísmico volcante, las cuales son más perjudiciales mientras más esbelto es el edificio. Para lograr su objetivo, el aislador debe ser capaz de resistir la fuerza de tracción impuesta permitiendo que la estructura se mantenga estable. El levantamiento en los dispositivos eventualmente podría cambiar el comportamiento oscilante de la estructura modificando su respuesta, la cual puede incrementar su respuesta dinámica, dependiendo de la excitación y parámetros del sistema. Si esta respuesta aumenta considerablemente, se podría producir un balanceo en la estructura lo suficientemente grande como para provocar volcamientos en torno al nivel de aislación, este fenómeno de volcamiento se conoce como “rocking” (Figura 6(a)) y su efecto podría aumentar en gran medida las aceleraciones de piso provocando daño estructural.

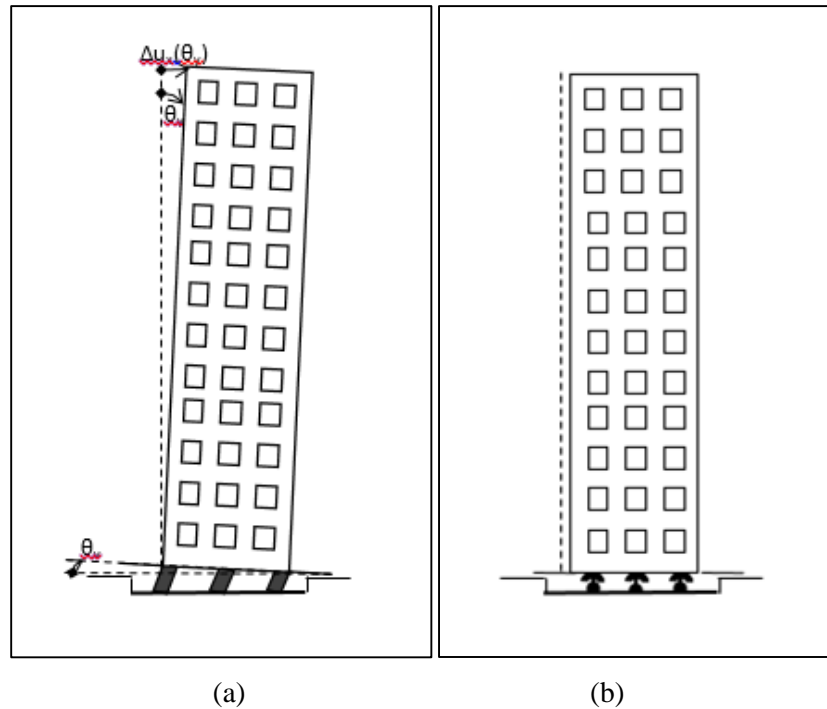


Figura 6: (a) Rocking en modelo con aisladores de goma, (b) Modelos con aisladores propuestos.

En primera instancia, esta investigación propone verificar experimentalmente si el uplift y el rocking pueden ser controlados de manera eficiente por el sistema de aislación propuesto. Para ello, se realizaron numerosas pruebas en mesa vibradora para cada maqueta con aislamiento. Los ensayos fueron grabados desde distintas perspectivas para analizar minuciosamente el comportamiento de los dispositivos ante excitaciones dinámicas. Esto permitió descartar, a través del hecho observado, la ocurrencia de levantamiento y rotación entorno al nivel de aislación.

2.4 Reducción de la respuesta en la estructura

Los sistemas de aislación sísmica de base, deflecan y disipan gran parte de la energía impuesta por el sismo en la interface de aislamiento, limitando así la energía que se transfiere a la superestructura. Esto reduce considerablemente los esfuerzos y deformaciones de la estructura con aislamiento, lo que en términos prácticos se refleja en una disminución significativa del daño estructural y no estructural, en comparación con estructuras sin aislamiento de base (Figura 7).

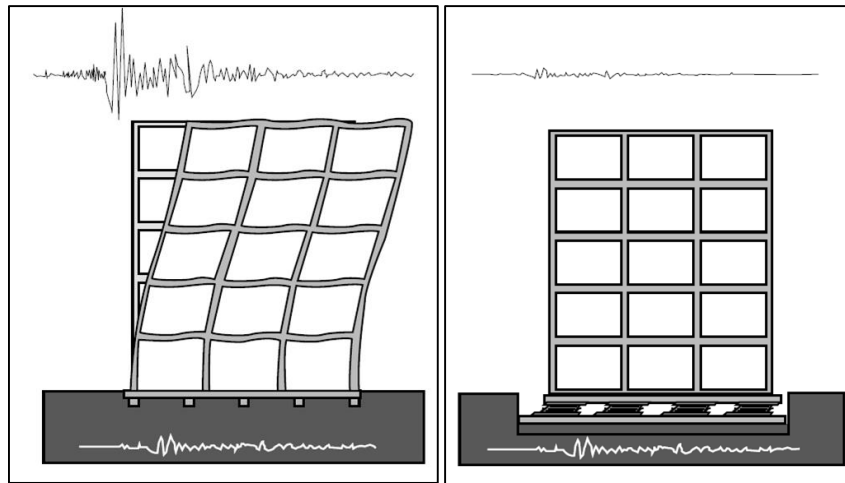


Figura 7: Edificio sin aislación sísmica de base vs edificio con aislación sísmica de base.
(Fuente: www.construccionyarquitecturaoficial.blogspot.cl)

El aislamiento basal flexibiliza al sistema estructural agregando una interface horizontalmente flexible y, por ende, alarga su período fundamental de forma considerable alejando a la estructura de la zona de mayor demanda sísmica (Figura 8), llevándola a una zona de mayor seguridad.

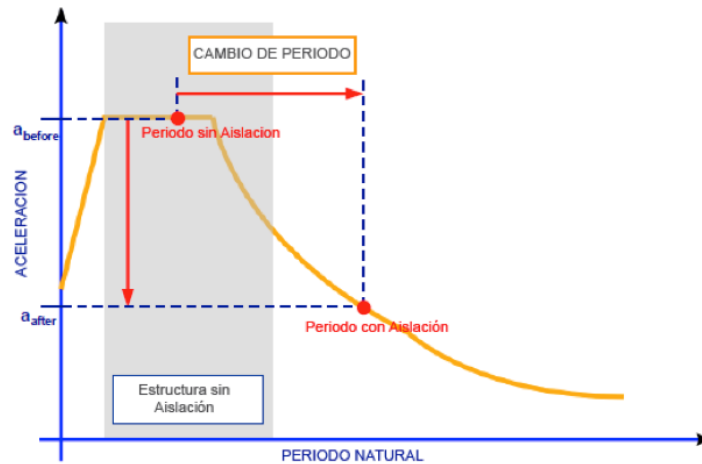


Figura 8: Modificación del periodo fundamental de una estructura fija, para llevar a cabo la aislación sísmica. (Fuente: www.tecnoav.cl).

De acuerdo a la teoría lineal, el modo fundamental de vibración de una estructura aislada está relacionado cercanamente al grado de libertad asignado al desplazamiento lateral del sistema de aislamiento. En este sentido, son los modos superiores de vibrar los que contribuyen a la deformación lateral y movimiento de la superestructura y, por tanto, al daño en los sistemas estructural, no estructural y en los contenidos de la estructura aislada (Naeim & Kelly, 1999). Un análisis que permita identificar las frecuencias y formas modales asociadas a las estructuras aisladas y a las estructuras sin aislamiento sísmico, podría determinar la contribución de cada modo de vibrar en la respuesta estructural para cada caso.

Con el propósito de evaluar la capacidad del sistema de aislamiento de controlar las vibraciones entre pisos se realizaron ensayos de laboratorio para las estructuras con base fija y para las estructuras



aisladas. Estas fueron implementadas con sensores que permiten obtener series de tiempo de aceleraciones de piso, las cuales fueron almacenadas de forma digital para su posterior procesamiento. A través de la base de datos obtenida experimentalmente, fue posible cuantificar la reducción de la respuesta realizando un análisis comparativo de la respuesta en estructuras aisladas y en estructuras fijas a la base.

Adicionalmente, a través de las mediciones experimentales, se pudo determinar las frecuencias y formas modales de la estructura, para estimar su participación en la respuesta estructural. Para ello se contemplan dos métodos, el primero de ellos corresponde a un análisis en el dominio del tiempo y se realiza en base a métodos de identificación que dependen básicamente de la capacidad del observador para identificar durante el ensayo la forma de vibración de cada modo. El observador debe registrar el tiempo en que se genera el modo de vibrar para posteriormente identificarlo en el registro de aceleraciones y, por medio de un conteo de ciclos armónicos, estimar el periodo de vibración. Aunque este método se aproxima a los resultados reales, no es muy certero. Por lo tanto, para obtener resultados más confiables se utilizó la transformada rápida de Fourier (FFT), que permite estudiar la influencia de cada armónico en la composición de la señal registrada experimentalmente. Para ello, se programó un código en matlab, que permite procesar el registro de aceleraciones y calcular el algoritmo mencionado.

De los espectros de frecuencia obtenidos, se puede medir el peak de frecuencias asociado a cada modo de vibrar, para luego obtener el periodo a través de la siguiente expresión:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (7)$$

Donde T_n y ω_n son el período y frecuencia natural de la estructura respectivamente.

Teniendo en cuenta que los ensayos realizados en la mesa vibradora solo se realizaron hasta un 50% de su capacidad, este estudio solo contempla la identificación de los modos 1 y 2 asociados a la superestructura más el modo aislado, para evaluar su participación en la respuesta estructural.

2.5 Formas y masas modales

Se amplía la técnica de identificación del sistema para determinar las formas y masas modales de cada estructura, con este propósito de evaluar su comportamiento dinámico frente a distintos tipos de solicitaciones.

Se determinaron los desplazamientos relativos de cada piso, medidos en los ensayos, realizando una integración doble a las series de aceleraciones. Las series de desplazamientos obtenidas, permitieron identificar los vectores simplificados que representan la forma de vibrar asociada a los modos 1 y 2.

En base a lo anterior, se graficaron las formas modales, considerando los desplazamientos obtenidos en los grados de libertad medidos en los ensayos. Para los pisos restantes, se ajustaron las curvas características asociadas a cada modo y se obtuvieron los desplazamientos de estos a través de interpolaciones.

Adicionalmente, se calcularon las masas para los modos de vibrar 1 y 2, con el fin de estimar cuál de ellos tiene mayor peso en la respuesta estructural. Las masas modales equivalentes de cada modo de vibrar, se calcularon según el apartado 6.3.2 de la Nch 433, donde se indica:

$$M_{nx} = \frac{(\{\phi_n\}^t [M] \{r_x\})^2}{\{\phi_n\}^t [M] \{\phi_n\}} \quad (8)$$

Donde $\{\phi_n\}$ es el vector ortogonalizado que representa la forma de vibrar asociada al modo n , $[M]$ es la matriz de masa de la estructura y $\{r_x\}$ es un vector correspondiente a los grados de libertad de los desplazamientos en la dirección del input.

3. RESULTADOS

Se realizaron ensayos de vibración libre con el propósito de caracterizar las maquetas y definir sus propiedades dinámicas. Para lo anterior, se perturbó manualmente la estructura desde su posición de equilibrio mediante desplazamientos iniciales, utilizando sensores para medir las aceleraciones producidas en pisos específicos en vibración libre. Estos ensayos se realizaron únicamente a las maquetas sin aislación sísmica, puesto que para los sistemas con aislamiento no fue posible obtener buenos resultados, debido a la gran cantidad de amortiguamiento del sistema de aislamiento.

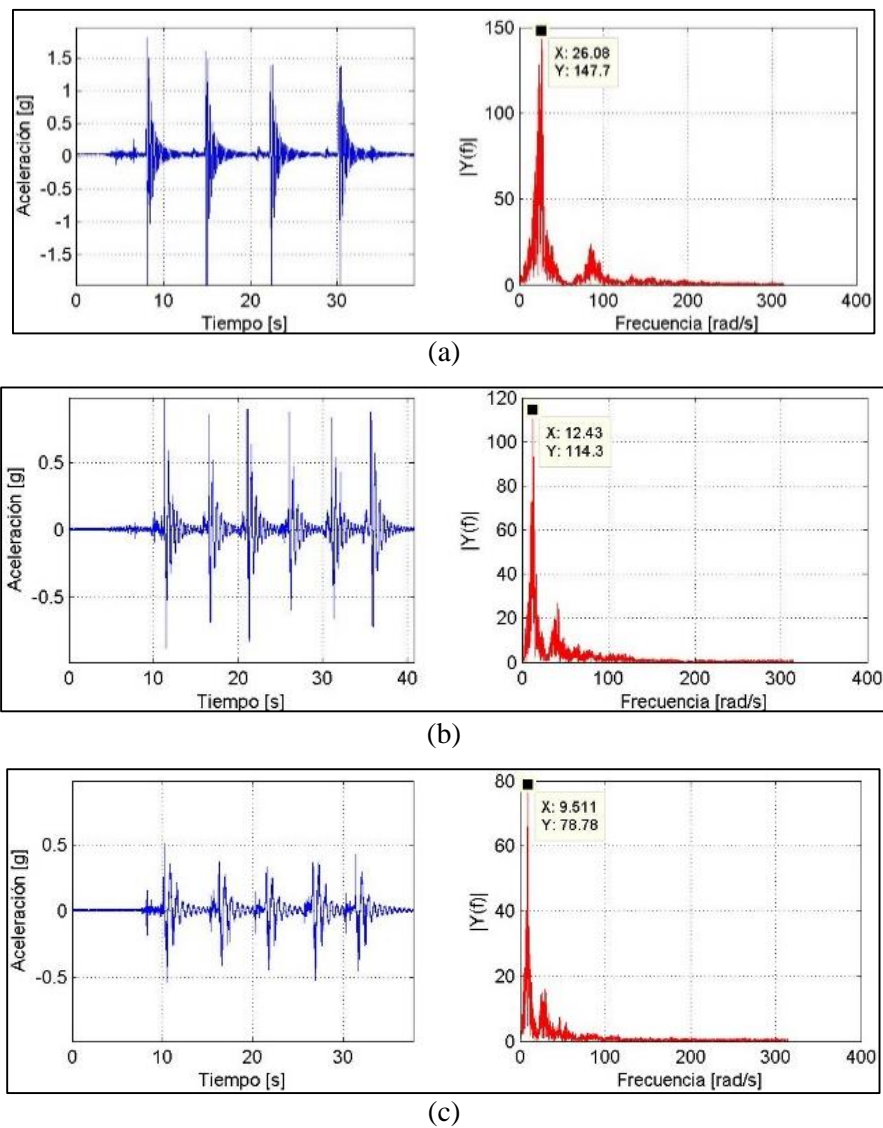


Figura 9: Ensayos vibración libre maquetas sin aislamiento, a la izquierda la señal de aceleración de techo y a la derecha su transformada de Fourier (a) maqueta 1, (b) maqueta 2, (c) maqueta 3.

Los resultados de la Figura 9 corresponden a la señal medida en el último piso de cada estructura, donde se obtienen los máximos desplazamientos asociados al modo fundamental de vibrar. A través de la transformada discreta de Fourier de la señal medida, fue posible identificar claramente las frecuencias asociadas al modo 1 (o modo fundamental) y al modo 2 de la estructura fija en la base, las cuales se ven reflejadas en los peaks.

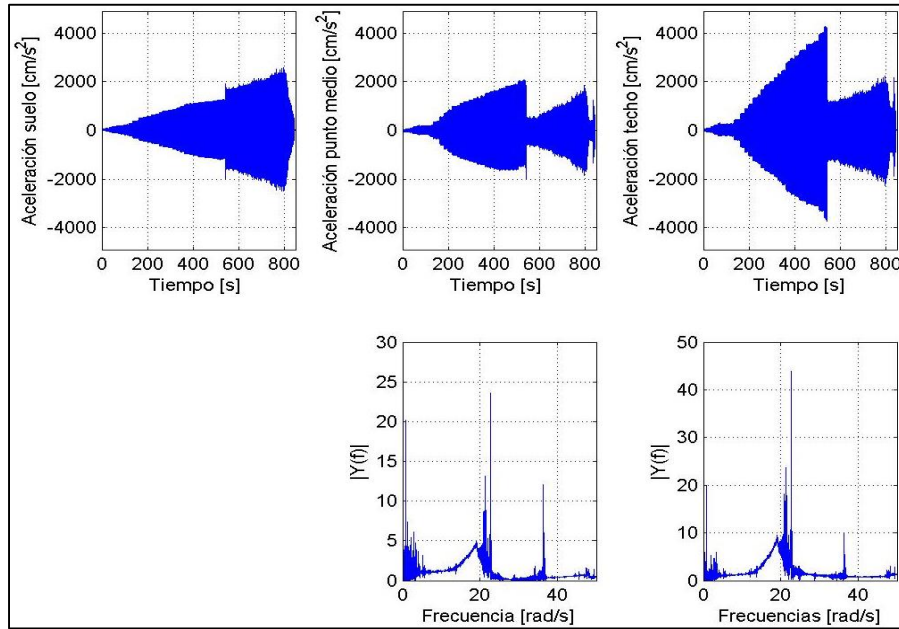


Figura 10: Ensayos de mesa vibradora. Maqueta 1 – Sin aislamiento basal

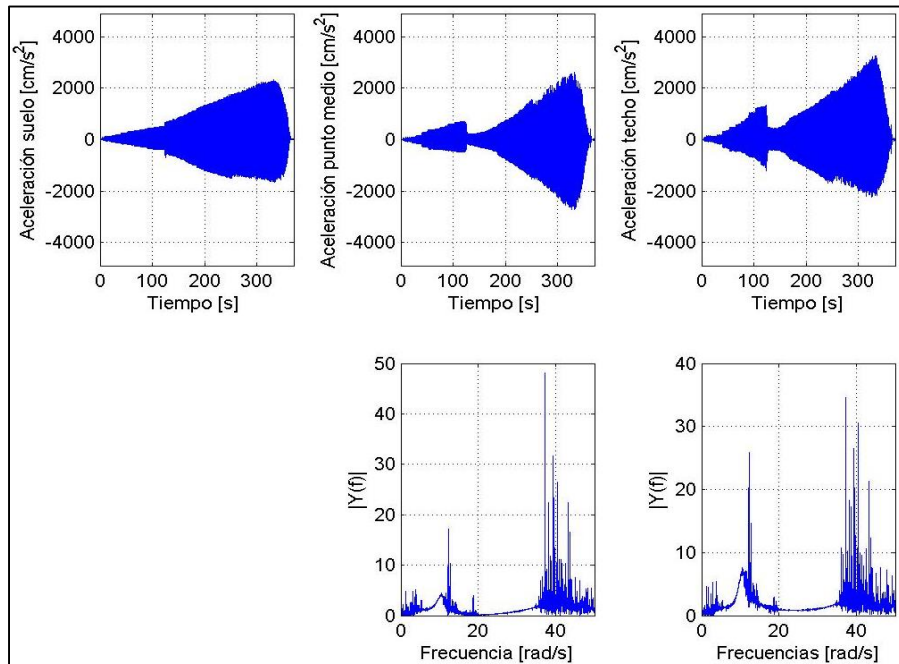


Figura 11: Ensayos de mesa vibradora. Maqueta 2 – Sin aislamiento basal

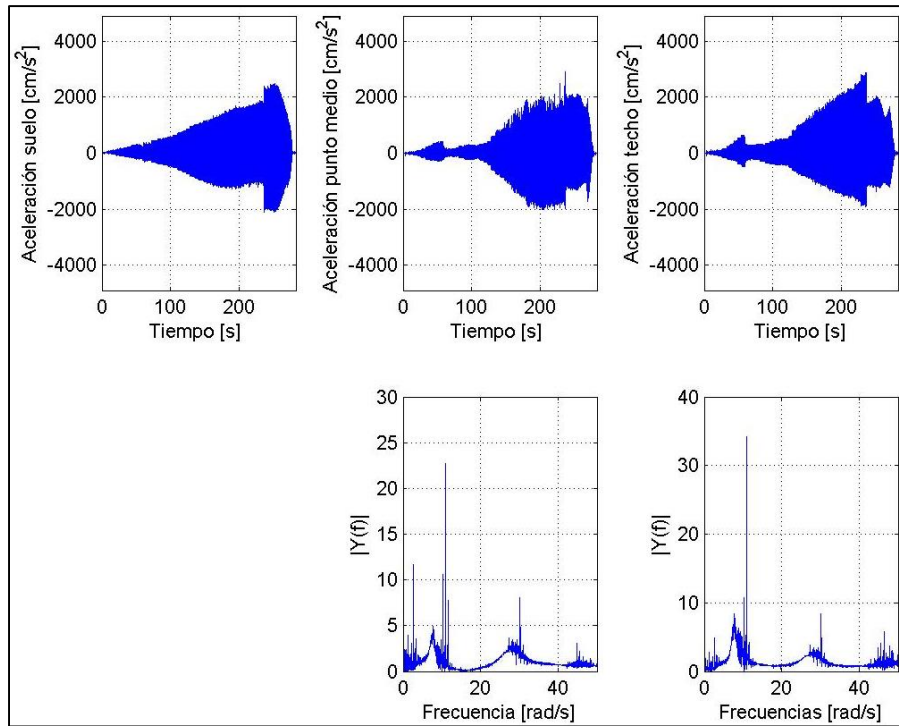


Figura 12: Ensayos de mesa vibradora. Maqueta 3 – Sin aislamiento basal

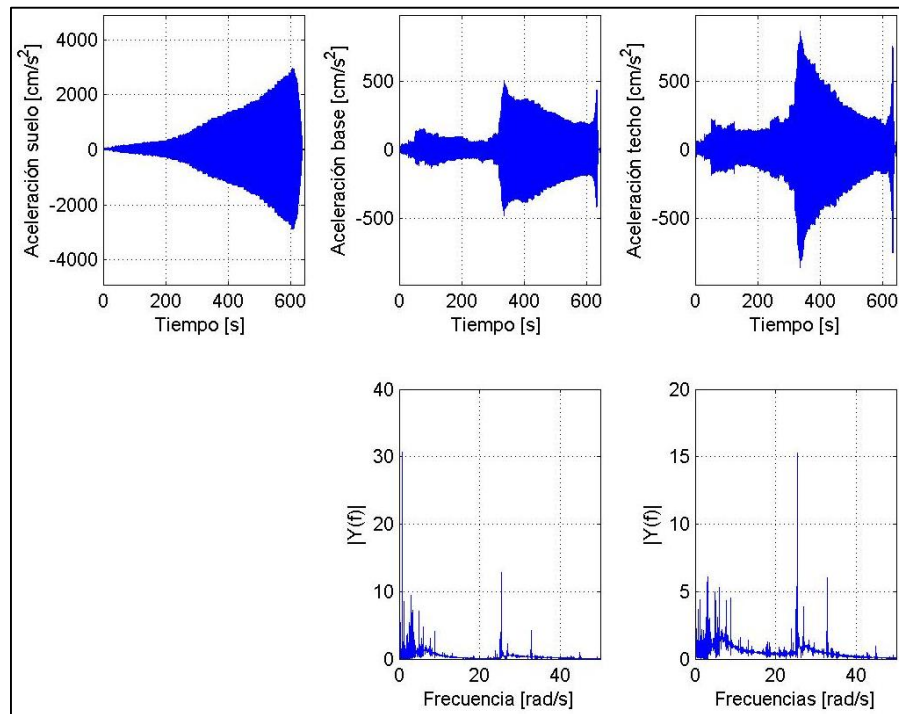


Figura 13: Ensayos de mesa vibradora. Maqueta 1 – Con aislamiento basal

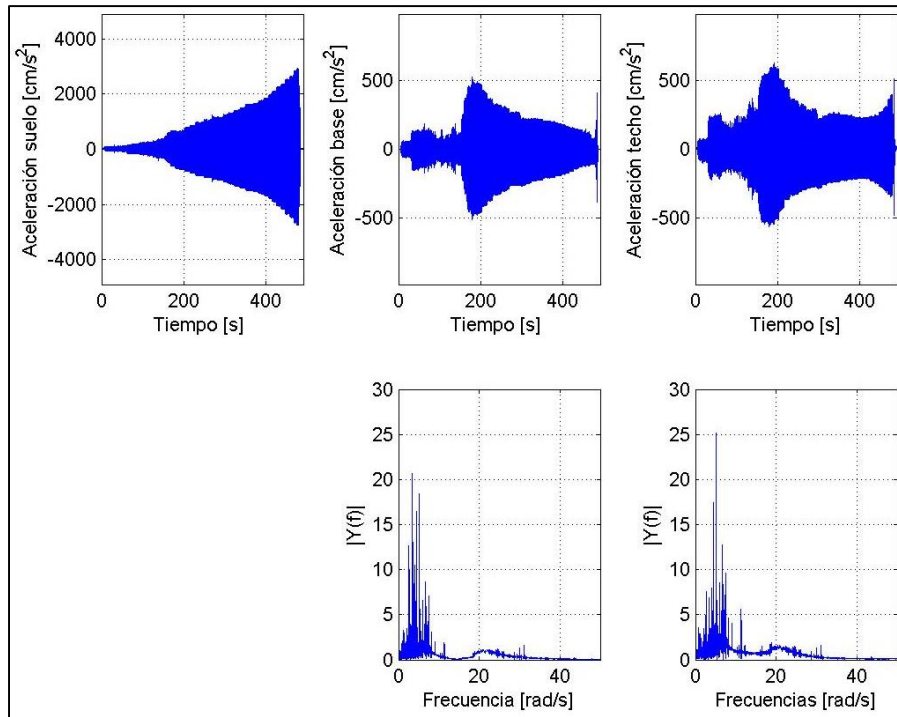


Figura 14: Ensayos de mesa vibradora. Maqueta 2 – Con aislamiento basal

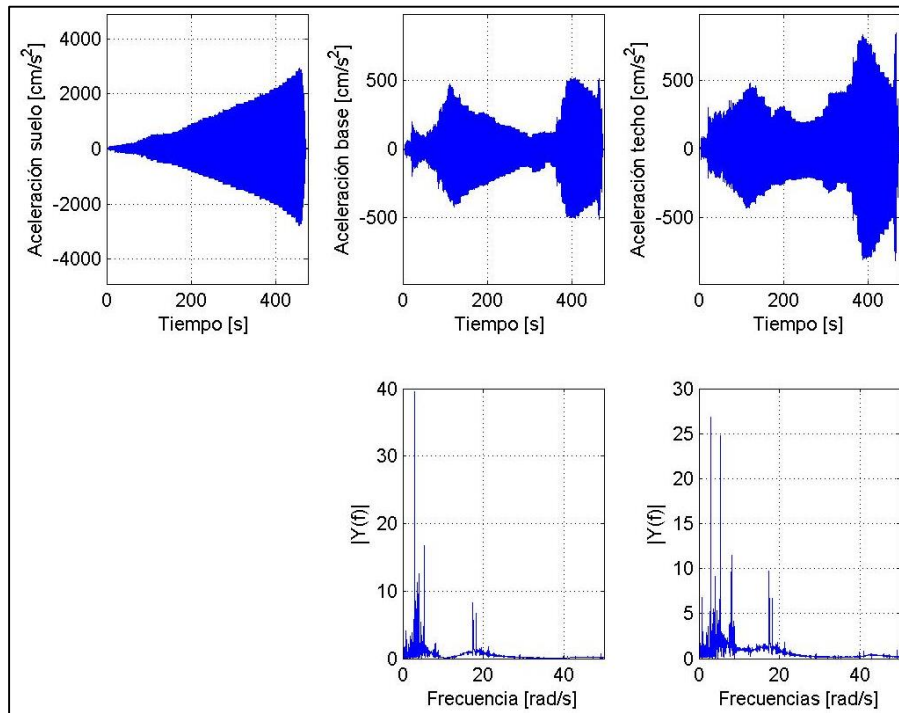


Figura 15: Ensayos de mesa vibradora. Maqueta 3 – Con aislamiento basal



En Figuras 10, 11 y 12, en la fila superior se muestran las series de aceleraciones medidas para maquetas sin aislamiento sísmico. Los sensores se ubicaron en la plataforma de la mesa vibradora, piso medio y en el último piso de la estructura respectivamente, lo cual se muestra de izquierda a derecha en las figuras. En la fila inferior de dichas figuras, se muestran los cocientes de las transformadas de Fourier de las señales de aceleraciones medidas en el piso respectivo y la transformada de Fourier de la aceleración medida en plataforma vibradora.

En Figura 13, 14 y 15, en la fila superior se muestran los registros de aceleraciones para maquetas con aislamiento sísmico, para las cuales los acelerómetros se ubicaron en la plataforma de la mesa vibradora, sobre el nivel de aislación y en el último piso de la estructura respectivamente, lo cual se muestra de izquierda a derecha en las figuras. En la fila inferior de dichas figuras, se muestran los cocientes de las transformadas de Fourier de las señales de aceleraciones medidas en el piso respectivo y transformada de Fourier de la aceleración medida en plataforma vibradora.

Con respecto a las series de tiempo v.s. aceleración mostrados en la primera fila de las figuras 10 a la 15, es posible hacer una comparación de ellos para estructuras aisladas y estructuras sin aislación con el propósito de cuantificar la reducción de la respuesta. Para ello, se consideraron los registros obtenidos en el último piso de la estructura y se identificó mediante un análisis comparativo que el sistema de aislación propuesto es capaz de disminuir las aceleraciones de piso hasta en un 65 %.

En relación a la transformada de Fourier de las series de tiempo obtenidas, es posible visualizar claramente en los peacks los modos de vibrar 1 y 2 asociados a la superestructura. Análogamente, es posible identificar el modo de vibrar asociado al sistema con aislación basal, aunque este último no está muy claramente definido, ya que se encuentra rodeado de otros peacks asociados a posibles ruidos producidos en los ensayos. Por lo tanto, para identificar con mayor claridad el periodo de este modo en particular, se utilizó como complemento el método visual antes descrito.

Tabla 3: Periodos asociados a cada modo de vibrar.

Maqueta	Sin Aislación				Con Aislación		
	Vibración Libre		Vibración Forzada		Vibración Forzada		
	T _n [s]	T ₂ [s]	T ₁ [s]	T ₂ [s]	T _a [s]	T ₁ [s]	T ₂ [s]
1	0,240	0,075	0,305	0,173	0,710	0,247	0,190
2	0,505	0,153	0,505	0,188	0,825	0,557	0,201
3	0,660	0,216	0,570	0,210	1,180	0,772	0,359

La tabla 3, muestra un resumen de los resultados obtenidos para cada ensayo realizado. De acuerdo a esto, se puede establecer en primer lugar que los resultados asociados al periodo de aislación, obtenidos mediante los ensayos de vibración forzada, coinciden prácticamente en su totalidad con los calculados teóricamente, mostrados en la tabla 2, con un margen de error mínimo.

Con respecto a los ensayos realizados a la estructura fija, fue posible identificar de forma certera el modo fundamental mediante los ensayos de vibración libre. Puesto que, para los ensayos de mesa vibradora en aquellas maquetas, se presentaron levantamientos y pequeñas rotaciones al nivel de la mesa vibradora, lo que eventualmente podría modificar las aceleraciones de la estructura.

El primer modo de vibrar de la estructura de base fija, corresponde al primer modo asociado al desplazamiento de la interface de aislamiento, T_a, para el caso de la estructura con aislamiento. De los resultados mostrados en la tabla 3, se puede confirmar que para las maquetas con aislamiento los periodos de oscilación aumentan considerablemente, casi doblando los periodos asociados a la estructura fija.

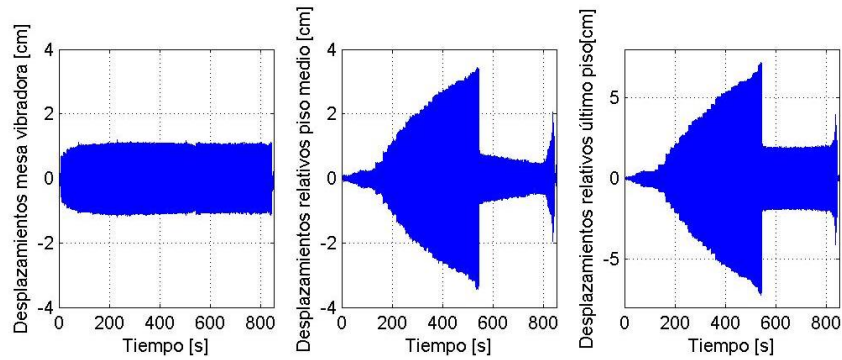


Figura 16: Desplazamientos relativos a la base. Maqueta 1 – Sin aislamiento basal

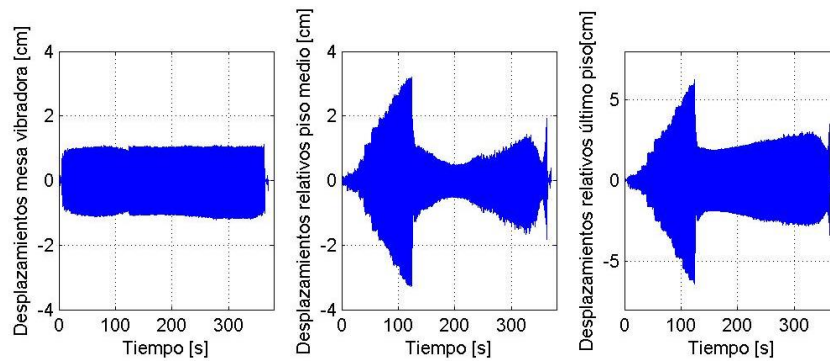


Figura 17: Desplazamientos relativos a la base. Maqueta 2 – Sin aislamiento basal

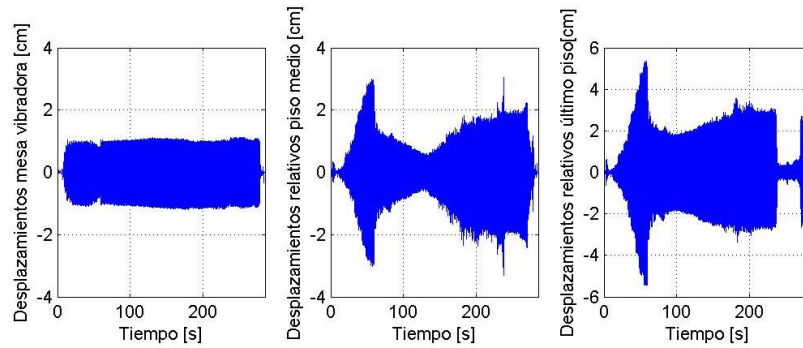


Figura 18: Desplazamientos relativos a la base. Maqueta 3 – Sin aislamiento basal

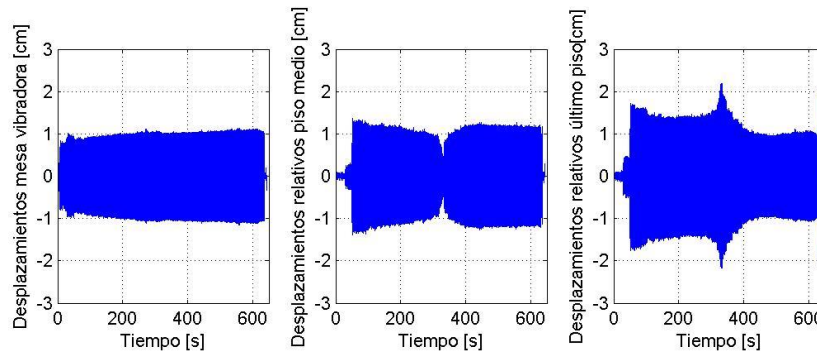


Figura 19: Desplazamientos relativos a la base. Maqueta 1 – Con aislamiento basal

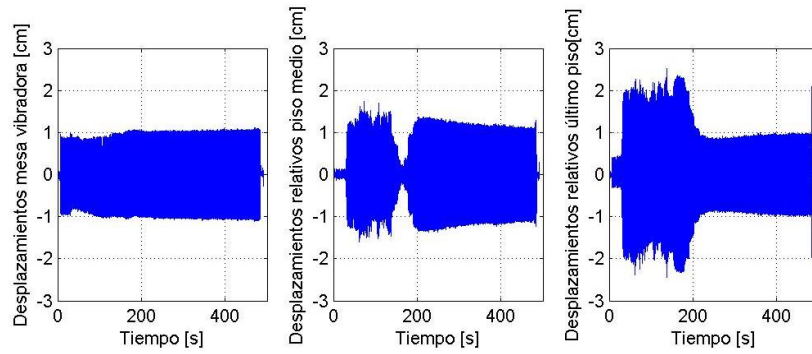


Figura 20: Desplazamientos relativos a la base. Maqueta 2 – Con aislamiento basal

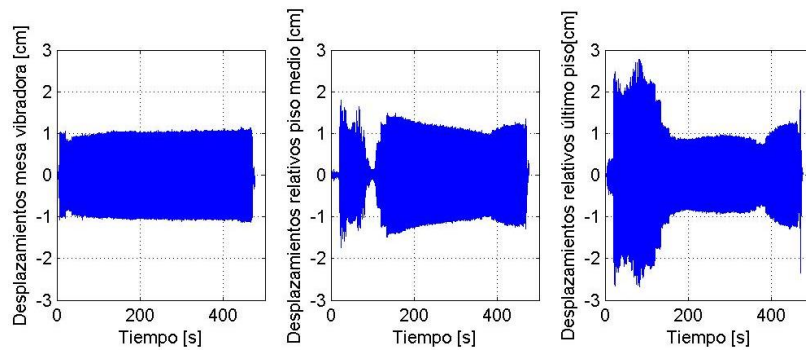


Figura 20: Desplazamientos relativos a la base. Maqueta 3 – Con aislamiento basal

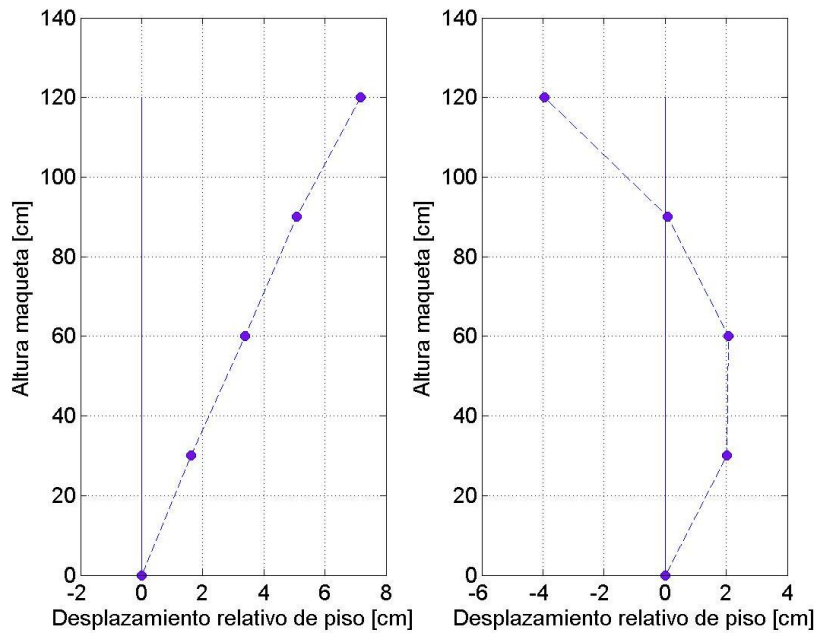


Figura 21: Formas modales. Maqueta 1 - Sin aislamiento de base

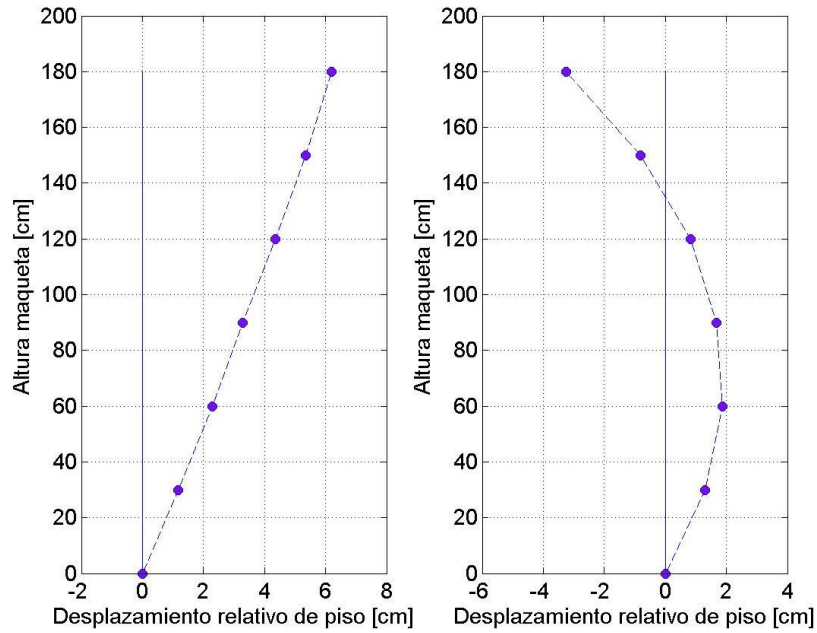


Figura 22: Formas modales. Maqueta 2 - Sin aislamiento de base

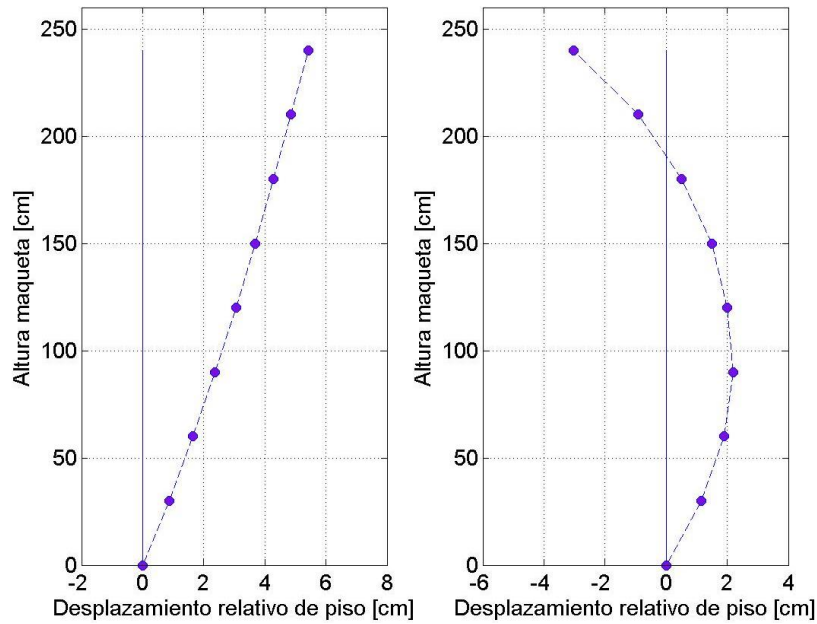


Figura 23: Formas modales. Maqueta 3 - Sin aislamiento de base

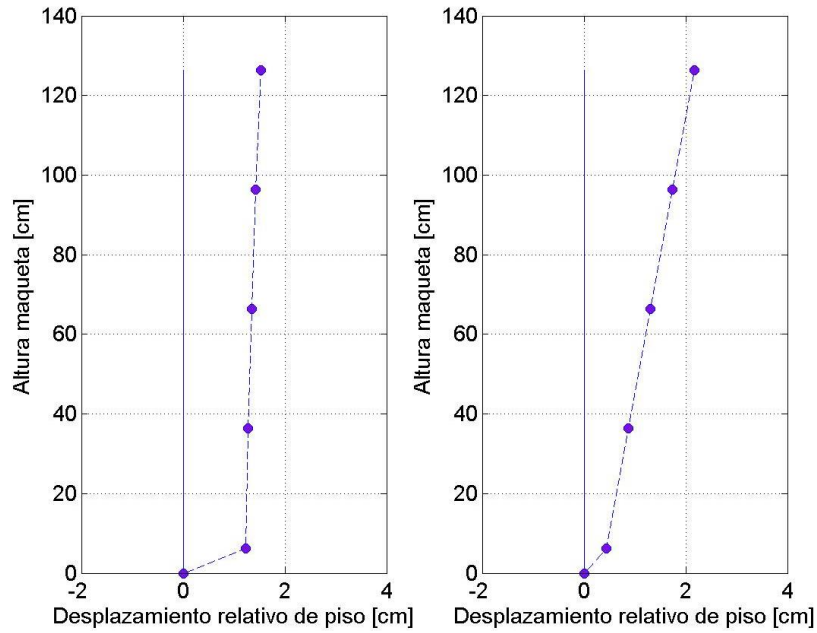


Figura 24: Formas modales. Maqueta 1 - Con aislamiento de base

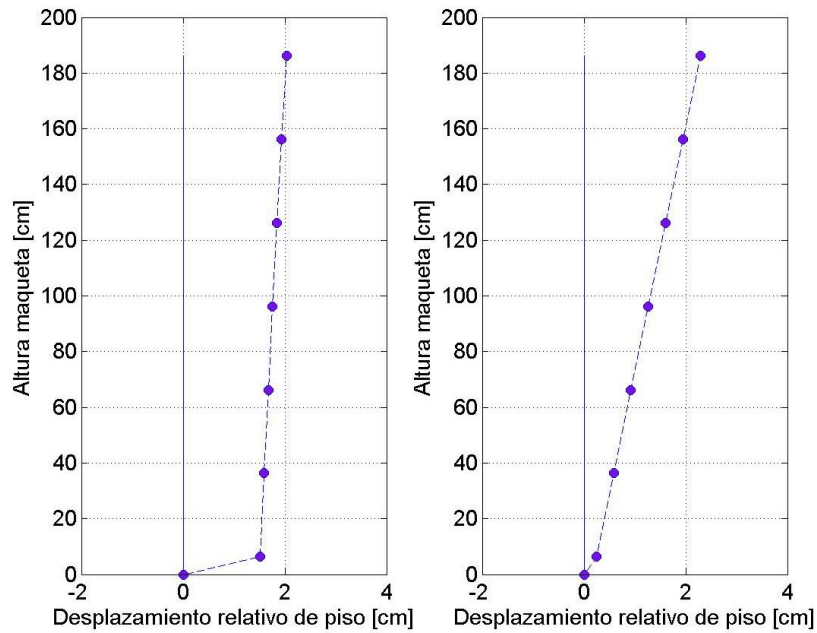


Figura 25: Formas modales. Maqueta 2 - Con aislamiento de base

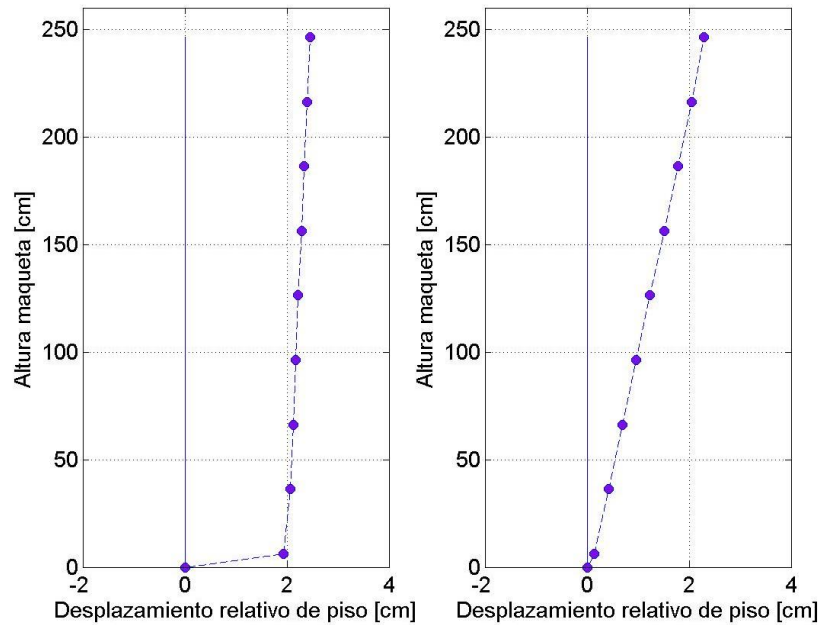


Figura 26: Formas modales. Maqueta 3 - Con aislamiento de base

En Figuras 21, 22 y 23, se muestran las formas de vibrar para maquetas fijas en la base. A la izquierda, se muestra el modo 1 y a la derecha modo 2. Los gráficos representan los edificios a escala, donde se muestran los desplazamientos relativos de piso de cada estructura.

En Figuras 24, 25 y 26, se muestran las formas de vibrar para maquetas fijas en la base. A la izquierda, se muestra el modo 1 (modo aislado) y en la derecha modo 2. Los gráficos representan los edificios a escala, donde se muestran los desplazamientos relativos de piso de cada estructura más el sistema de aislación, cuya altura es de 63 mm.

De las figuras, se puede concluir que en un edificio con aislamiento sísmico se concentra la deformación en la interface de aislamiento y no en la superestructura. Esto resulta en una favorable reducción de las deformaciones desarrolladas en la superestructura y mejorando el comportamiento estructural ante eventos sísmicos.

Tabla 4: Masas equivalentes para cada modo de vibrar

Maqueta	Sin Aislación			Con Aislación		
	M_{1x}	M_{2x}	M_{1x}/M_{2x}	M_{1x}	M_{2x}	M_{1x}/M_{2x}
1	4.049	1.955	2.071	7.235	1.641	4.409
2	5.612	0.643	8.728	9.175	1.633	5.618
3	7.189	1.713	4.197	11.203	1.375	8.148

En Tabla 4, como es de esperar se puede observar que el modo 1 de la estructura tiene mayor peso en su respuesta tanto en el edificio fijo como en el aislado. Sin embargo, la proporción de las masas de modos 1 y 2 son diferentes en los modelos con y sin aislamiento. A excepción de la maqueta 2, que reproduce a un edificio de 18 pisos, en las maquetas 1 y 3 la proporción entre las masas modales 1 y 2 resultó ser mayor en los modelos con aislamiento. Se observa en todas las maquetas la predominancia del modo aislado o modo 1 correspondiente. Es importante mencionar que una mayor participación del modo 1 en modelos con aislamiento, redundará en concentración de demanda sísmica



de deformación en la interface de aislamiento, reduciendo así la demanda en la superestructura. Por lo anterior, incluso en maqueta 2 donde la proporción de masas modales 1 y 2 resultó ser mayor que en su símil con aislamiento, se espera en esta última una respuesta atenuada de la superestructura. Esto debido a que los modos superiores de un edificio con aislamiento son los que principalmente se relacionan con la deformación de la superestructura.

4. CONCLUSIÓN

El propósito de este estudio ha sido demostrar experimentalmente el buen desempeño estructural del nuevo dispositivo de aislación sísmica propuesto, verificando su capacidad de resolver los problemas de tracción e inestabilidad lateral que se presentan habitualmente en aisladores elastoméricos, con el fin de poder ser implementados en estructuras más altas y esbeltas que en la actualidad. A través de un minucioso análisis visual de los resultados experimentales se pudo establecer que no se presentó levantamiento local en los dispositivos ni rotación en torno al nivel de aislación en ninguna de las maquetas estudiadas. Por lo tanto, es posible asegurar por medio de este análisis, que el dispositivo propuesto tiene el potencial suficiente para ser utilizado en estructuras rectangulares de hasta 24 pisos, con esbeltez de hasta 6.

A partir de los resultados de este estudio fue posible determinar que los dispositivos de aislación sísmica pueden aumentar significativamente el periodo fundamental de la estructura, reduciendo la respuesta de la superestructura favorablemente. Esto se pudo visualizar por medio de un análisis comparativo de los registros obtenidos mediante los ensayos, para los modelos aislados y modelos sin aislación sísmica en las figuras 10 a la 15. De acuerdo a lo anterior, se puede afirmar que la implementación de este novedoso sistema de aislación de base permite disminuir las aceleraciones de piso en aproximadamente un 65% en las estructuras aisladas comparadas con estructuras sin aislamiento sísmico.

En base a los resultados obtenidos, se puede asegurar que el dispositivo propuesto tiene el potencial de permitir extender el uso de la tecnología de aislamiento sísmico en forma segura a edificios más altos y/o esbeltos que en la actualidad. Destaca la eficacia del dispositivo propuesto como sistemas de control de vibraciones. Éste permitió que la estructura se mueva fundamentalmente como cuerpo rígido, concentrando deformación en la interface de aislamiento, reduciendo así la demanda sísmica en la superestructura. Esto permite mitigar de manera considerablemente las vibraciones estructurales y daños durante eventos sísmicos, proporcionando mayor seguridad a los ocupantes.

LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

- Determinar los parámetros límites asociados a la altura y esbeltez del edificio, para los cuales es factible utilizar el dispositivo de aislación sísmica propuesto.
- Profundizar en este estudio experimental, de tal manera de tener certeza absoluta de que no hay levantamiento en los aisladores, utilizando instrumentos de medición adecuados para ello.
- Evaluar experimentalmente el dispositivo en estudio implementado en estructuras con distintas configuraciones geométricas de losas.
- Realizar un análisis lineal a la mesa vibradora utilizada, para asociar la potencia generada a la magnitud real de un terremoto.



- Profundizar en el análisis modal, considerando los modos de vibración restantes, para que la participación modal sea a lo menos un 90% de la masa total del sistema como indica la norma.

5. REFERENCIAS

Ahmadi, G. & Su, L., (1992). Equipment response spectra for base-isolated Shear Beam Structures. *Nuclear Engineering and Design*, 132(3), 287-308.

Apostolou, M., Gazetas, G. & Garini, E., (2007). Seismic response of slender rigid structures with foundation uplifting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 642-654.

Bravo, J. C., Maureira, N. & Matthews, P., (2016). *Implementación de aislamiento sísmico elastomérico en edificios altos y esbeltos de acero estructural*. Informe de proyecto de título para optar al título de ingeniero civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Ingeniería.

Carrasco, D., Maureira, N., & Sanhueza, F., (2007). *Análisis experimental de un nuevo dispositivo de aislamiento sísmico para validación de su relación constitutiva*. Artículo científico para optar al título de ingeniero civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Ingeniería.

Carrillo, J., Bernal, N. & Porrás, P., (2013). Evaluación del diseño de una pequeña mesa vibratoria para ensayos en ingeniería sísmo-resistente. *Redalyc*, 89-105.

Griffith, M. C., Aiken, I. D. & Kelly, J. M., (1990). Displacement control and uplift restraint. *Journal of Structural Engineering*, 118(6): 1666-1682.

Hurty, W. C., (1965). Dynamic Analysis of Structural Systems Using Component Modes. *AIAA Journal*, 3(4), 678-85.

Johnson, E., J. Ramallo, B. Spencer & M. Sain. (1998). Intelligent Base Isolation Systems. *Presented at the 2th World Conference on Structural Control (CD)*, (págs. 367-76). Kyoto, Japón.

Kelly, J. M. (1991). Base Isolation: origins and development. *EERC News*, 12(1), 1-3.

Kelly, J. M. (1993). *Earthquake-resistant design with rubber*. London: Springer-Verlag.

Kelly, J. M. (2003). Tension Buckling in Multilayer Elastomeric Bearings. *Journal of Engineering Mechanics*, 129(12): 1363-1368.

Keri L. Ryan & Anil K. Chopra. (2006). Estimating Seismic Demands for Isolation Bearings. *Journal of structural engineering*, 132(7): 1118-1128.

Komuro, T., Nishikawa, Y., Kimura, Y. & Isshiki, Y. (2005). Development and Realization of Base Isolation System for High-Rise Buildings. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3(2), 233-239.

Mahdi, A. & Abdelhafid, O. (2015). Seismic response reduction using semi-active magnetorheological dampers. *Innovation in construction*. At ENS Cachan PARIS.

Moehle, J. (1992). Displacement-Based Design of RC Structures Subjected to Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 8, 403-28.

Naeim, F. & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. New York: John Wiley & Sons.

Nagarajaiah, S. & Reinhorn A. M. (1992). Experimental study of sliding isolated. *Journal of Structural Engineer*, 118(6): 1666-1682.

- NCh 433.** (2009). Diseño Sísmico de Edificios. Norma Chilena Oficial. Instituto Nacional de Normalización.
- Priestley, M., G. M. Calvi & M. J. Kowalsky.** (2007). Displacement-Based Seismic Design of Structures. *IUSS Press*, 1453-60.
- Psycharis, I. N., & Jennings, P. C.** (1983). Rocking of slender rigid bodies allowed to uplift. *earthquake engineering and structural dynamics*, 11, 57-76.
- Rozas, L., Boroscchek, R.** (2009). *Reducción de la respuesta estructural por medio del uso de disipadores de masa sintonizada y disipadores de columna líquida sintonizada*. Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería, Mención ingeniería sísmica, Universidad de Chile, Departamento de ingeniería civil.
- Setareh, M., Hanson, R. D. & Peek, R.** (1992). Using component mode synthesis and static shapes for tuning tmds. *Journal of Structural Engineering*, 118(3): 763-782.
- Shinozaki, Y., Hozosawa, O. & Komuro, T.** (2004). Structural Desing of Base- Isolation system for Tall Building in Japan. *CTBUH Journal*, 10-13.
- Suarez, L. E., & Singh, M. P.** (1992). Modal synthesis method for general dynamic systems. *Journal of Engineering Mechanics*, 118(7): 1488-1503.
- Toledo, V., Maureira, N. & Sanhueza, F.** (2007). *Modelo matemático de un nuevo dispositivo de aislamiento sísmico, análisis paramétrico e implementación numérica en edificio simple*. Informe de proyecto de título para optar al título de ingeniero civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Ingeniería Civil.
- Zuñiga, O. & Terán, A.** (2012). Control de aceleraciones de entrepiso para sistemas estructurales con aislamiento sísmico de base. *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 87 25-45.