

# CALIBRATION AND MODELING OF ELASTOMERIC BEARINGS WITH UPLIFT RESTRAINERS USING COMERCIAL SOFTWARE

Dimas Francisco Parra García <sup>(1)</sup>, Arturo Tena Colunga <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Maestro en Estructuras, Posgrado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, 02200 Ciudad de México.

Correo electrónico: [franciscopaga@hotmail.com](mailto:franciscopaga@hotmail.com).

<sup>(2)</sup> Profesor, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Edificio P4, 3er Piso, Av. San Pablo # 180, 02200 Ciudad de México.

Correo electrónico: [atc@correo.azc.uam.mx](mailto:atc@correo.azc.uam.mx).

Received: June 2023. Accepted: December 2023

Published: January 2024

## ABSTRACT

The application of seismic isolation in high-rise and slender buildings is increasing in recent times worldwide. Then, it will be more frequent to give sound solutions for projects where significant tensile forces or uplifts would be demanded in corner and perimeter base isolators. For such projects, it would be necessary to use (and design) base isolators with uplift restrainers. There are already sound solutions to include uplift restrainers in elastomeric bearings which efficacy have been shown in shaking table tests. However, their use in real buildings has not been documented yet, perhaps because they are not yet well known or commercially available. Besides, there are no specific elements that may allow to model them directly using commercial structural analysis or finite element software. Then, *a-priori*, its appropriate discretization in 3D design models is somewhat difficult. In this work, the authors propose and show how can these base isolators with uplift restrainers be modeled in ETABS using a combination of elements already available in its library. The proposed modeling was calibrated and compared with the results obtained from shaking table tests, as reported in the technical literature. The obtained correlations between analytical models and experimental results were reasonable for practical purposes.

**Keywords:** seismic isolation, elastomeric bearings, uplift restrainers, analytical modeling

# MODELADO Y CALIBRACIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON RESTRICTORES AL DESPLAZAMIENTO VERTICAL UTILIZANDO SOFTWARE COMERCIAL

## RESUMEN

Dada la tendencia al alza a nivel mundial del empleo del aislamiento sísmico en edificios altos y esbeltos en tiempos recientes, será cada vez más frecuente intentar dar soluciones seguras a proyectos donde se presenten grandes demandas de tensión y/o fuerzas de alzamiento en los aisladores de esquina y de perímetro. Por ello, será necesario implantar aisladores que dispongan de dispositivos que restrinjan su desplazamiento vertical y que hayan sido diseñados para ello. Existen desde hace tiempo soluciones de este tipo para aisladores elastoméricos y cuya eficacia ha sido demostrada en ensayos en mesa vibradora. Sin embargo, su uso en edificios existentes no ha sido documentado todavía, entre muchos otros factores, porque quizás son poco conocidos o no se encuentran disponibles comercialmente. Además, no existen modelos constitutivos específicos que se encuentren disponibles en las librerías del software comercial. Esto dificulta, *a-priori*, su inclusión expedita en modelos tridimensionales de edificios para proyectos de diseño. En este trabajo se presenta cómo se pueden modelar razonablemente elastómeros laminados con dispositivos restrictores al alzamiento utilizando elementos ya disponibles en la librería del programa ETABS. El modelado propuesto se calibra y compara con los resultados reportados en la literatura para ensayos realizados en mesa vibradora, obteniéndose una aproximación bastante razonable.

**Palabras clave:** aislamiento sísmico, elastómeros laminados, restricción al alzamiento, modelado analítico

## 1 INTRODUCCIÓN

Como es bien conocido, en zonas sísmicas, la esbeltez global de los edificios aumenta la potencial generación de fuerzas de tensión netas en las columnas de perímetro y de esquina, sobre todo en su base. Esto no es la excepción en estructuras esbeltas aisladas en su base, donde se pueden presentar también estas demandas de tensión o de alzamiento en los aisladores elastoméricos, como se ha demostrado tanto en estudios paramétricos (Li y Wu 2006, Ryan y Chopra 2006, Hino *et al.* 2008, Takaoka *et al.* 2011, Maza y Maza 2020, Xu *et al.* 2021), como en estudios experimentales en pruebas en mesa vibradora (Kelly *et al.* 1987, Griffith *et al.* 1990, Zhou *et al.* 2017, Shen *et al.* 2019).

Las fuerzas dinámicas netas de tensión ponen en riesgo la estabilidad dinámica de los aisladores elastoméricos, debido al muy reducido esfuerzo admisible a tensión del hule (Naeim y Kelly 1999, Takayama *et al.* 2004, Mano y Mangerig 2015, Shen *et al.* 2016) y al fenómeno de cavitación del hule, que además disminuye su rigidez en tensión (Gent y Lindley 1959, Kelly 1993, Pond 1995, Dorfmann y Burtcher 2000, Kelly y Thakirov 2007, Kelly y Marsico 2013, Mano y

Mangerig 2015, Kumar *et al.* 2015). Este fenómeno se magnifica porque esta tensión está acompañada de grandes deformaciones por cortante horizontal bajo fuertes excitaciones sísmicas (Shen *et al.* 2016). Por ello, el esfuerzo admisible a tensión del hule se limita a  $2G$  en reglamentaciones internacionales, donde  $G$  es el módulo a cortante del hule o caucho (Mano y Mangerig 2015). Sin embargo, existen estudios experimentales donde se ha obtenido un límite de hasta  $3G$  (Kumar *et al.* 2015). Sin embargo, cabe señalar que el que se generen importantes fuerzas de tensión y alzamiento en los aisladores no cancela totalmente la posibilidad de diseñar un sistema de aislamiento sísmico competente. Para esos casos, se han ensayado experimentalmente en mesa vibradora, con éxito, dispositivos que permiten controlar estos alzamientos para aisladores elastoméricos (Kelly *et al.* 1987, Griffith *et al.* 1990, Zhou *et al.* 2017, Shen *et al.* 2019).

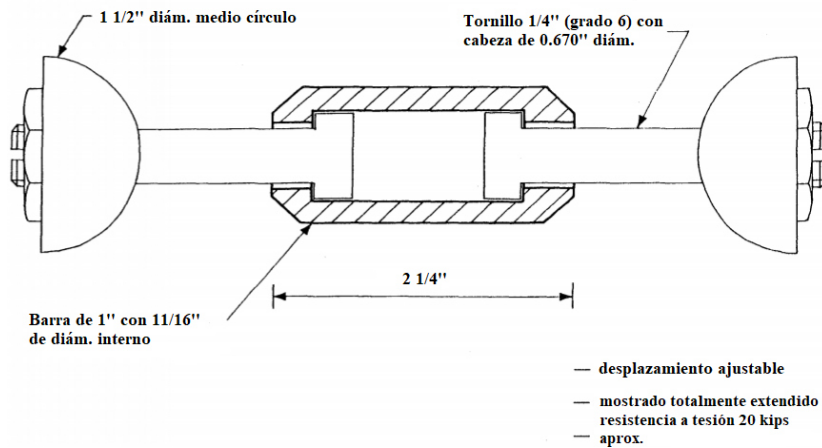
Dada la tendencia a la alza a nivel mundial del empleo del aislamiento sísmico en edificios altos y esbeltos en tiempos recientes, será cada vez más frecuente intentar dar soluciones seguras a proyectos donde se presenten grandes demandas de tensión y/o fuerzas de alzamiento en los aisladores de esquina y de perímetro. Por ello, será necesario implantar aisladores que dispongan de dispositivos que restrinjan su desplazamiento vertical y que se hayan diseñado expreso para ello. Sin embargo, hasta donde es del conocimiento de los autores, su uso en edificios existentes no ha sido documentado todavía, entre muchos otros factores, porque quizás son poco conocidos o no se encuentran disponibles comercialmente. Además, no existen modelos constitutivos específicos que se encuentren disponibles en las librerías del software comercial. Esto dificulta, *a-priori*, su inclusión expedita en modelos tridimensionales de edificios para proyectos de diseño. Por ello, en este trabajo se presenta, en las siguientes secciones, cómo se pueden modelar razonablemente dichos dispositivos utilizando elementos ya disponibles en la librería del programa ETABS. El modelado propuesto se calibra y compara con los resultados reportados en la literatura para ensayos realizados en mesa vibradora, obteniéndose una aproximación bastante razonable.

## 2 DISPOSITIVO DE RESTRICCIÓN AL ALZAMIENTO PARA ELASTÓMEROS LAMINADOS

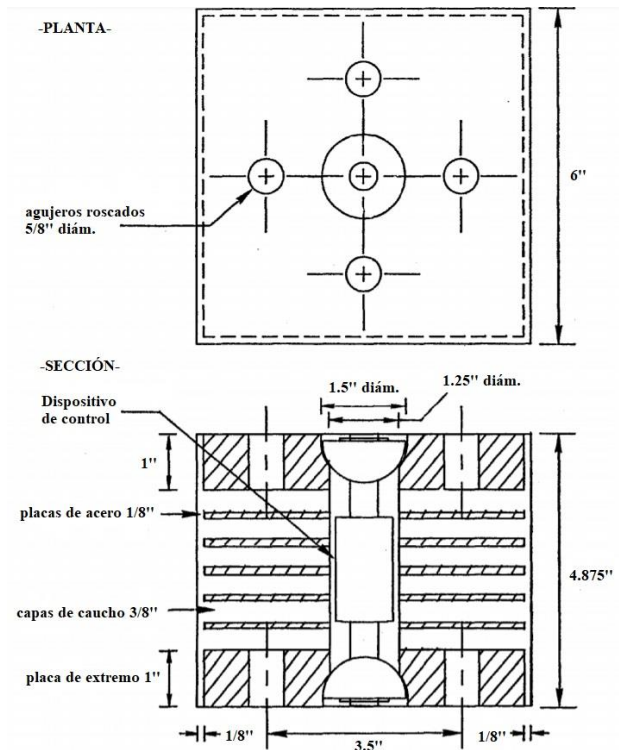
Kelly *et al.* (1987) desarrollaron un sistema de aisladores elastoméricos con dispositivos que restringen los desplazamientos horizontales y que resisten fuerzas de tensión evitando el daño en los elastómeros. Además, fueron ensayados en una estructura a escala  $\frac{1}{4}$ , en la mesa vibradora del Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica de la Universidad de California en Berkeley, como se describe a continuación.

El dispositivo utilizado en las pruebas experimentales para proporcionar control de desplazamiento y resistencia a tensión se compone de dos pernos dentro de un tubo circular metálico, como se muestra en la Figura 1. Los pernos se pueden desplazar una cierta distancia (que se ajusta, dependiendo de cada diseño) dentro del tubo metálico (Figura 2). Cuando el aislador se ha desplazado horizontalmente a través de esa distancia, las cabezas de los pernos quedan restringidas por los extremos del tubo metálico. Con esta restricción, la rigidez horizontal del aislador aumenta considerablemente. Si bien esto da como resultado un aumento repentino de la rigidez, no hay una parada repentina del desplazamiento porque, aunque el

dispositivo de restricción ahora es inextensible, el aislador puede continuar deformándose horizontalmente al mismo tiempo que se deforma verticalmente (Kelly *et al.* 1987). Por tanto, la rigidez horizontal, que normalmente es relativamente baja, se vuelve comparable con la rigidez vertical, que es mucho mayor (Kelly *et al.* 1987).



**Figura 1** Dispositivo de control de desplazamientos y resistencia de fuerzas de tensión (figura adaptada de Kelly *et al.* 1987)



**Figura 2** Aislador elástico laminado modificado con dispositivo de control de desplazamientos y resistencia de fuerzas de tensión (figura adaptada de Kelly *et al.* 1987)

El aislador elastomérico que fue utilizado en las pruebas era de sección cuadrada de seis pulgadas (15.24 cm) por lado, placas de acero superior e inferior de una pulgada (2.54 cm) de espesor, cinco placas delgadas internas de acero de 1/8" (0.32 cm) de espesor cada una y seis capas de caucho de 3/8" (0.95 cm) de espesor cada una, para dar una altura total de 4.875 pulgadas (12.38 cm). El aislador fue perforado de extremo a extremo en el centro para insertar el dispositivo, como se muestra en la Figura 2, y retenido con las placas de una pulgada (2.54 cm) en ambos extremos. De este modo, cuando el aislador no se desplaza, las cabezas de los pernos están juntas en el centro del tubo metálico, mientras que cuando el aislador se desplaza a través de la distancia preseleccionada, el dispositivo se tensa. Para permitir que el aislador/dispositivo resista las fuerzas de tensión, es necesario que los cuatro orificios para pasadores en cada placa de extremo (superior e inferior) estén roscados y, con esto, el aislador se encuentre firmemente conectado a la base y a la superestructura.

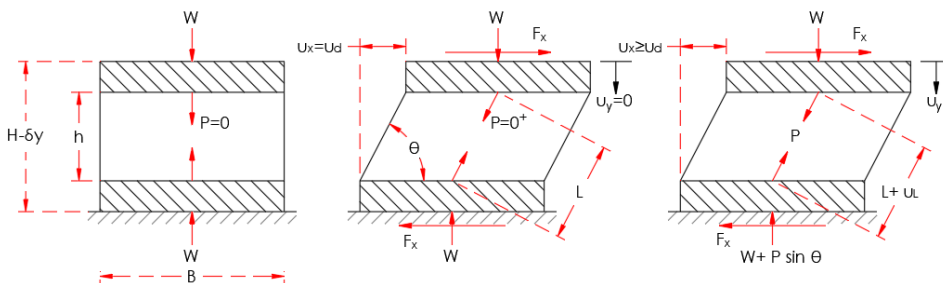
## 2.1 Modelado matemático propuesto por Kelly *et al.* (1987)

Para establecer una relación entre la fuerza cortante y el desplazamiento horizontal, Kelly *et al.* (1987) desarrollaron un modelo matemático a partir del comportamiento mecánico del aislador con el dispositivo, tomando en cuenta las rigideces horizontal y vertical del aislador elastomérico y la geometría del aislador en diferentes etapas de desplazamiento (Figura 3), conforme a la teoría de comportamiento elástico lineal de los materiales, así como pequeñas deformaciones en el acero.

Con base en la mecánica de la deformación del aislador elastomérico con restricción al desplazamiento (Figura 3), Kelly *et al.* (1987) encontraron las siguientes relaciones, con base en las dimensiones, desplazamientos y fuerzas que se indican precisamente en la Figura 3:

$$\sin \theta = \frac{h-u_y}{L+u_L} \quad , \quad \cos \theta = \frac{u_x}{L+u_L} \quad , \quad e_x = u_x - u_y \quad (1)$$

$$(L + u_L)^2 = u_x^2 + (h - u_y)^2 \quad (2)$$



**Figura 3** Mecánica de la deformación del aislador elastomérico con el dispositivo de control de desplazamientos (figura adaptada de Kelly *et al.* 1987)

Así, y de acuerdo con el desarrollo matemático completo que se presenta con detalle en Kelly *et al.* (1987), la fuerza horizontal actuante en el dispositivo ( $F_x$ ) se obtiene con la ecuación 3:

$$F_x = k_h u_d + \left[ k_h + \frac{k_v u_d^2}{h^2 + L^2 \frac{k_v}{k_d}} \right] e_x + O(e_x)^2 \quad (3)$$

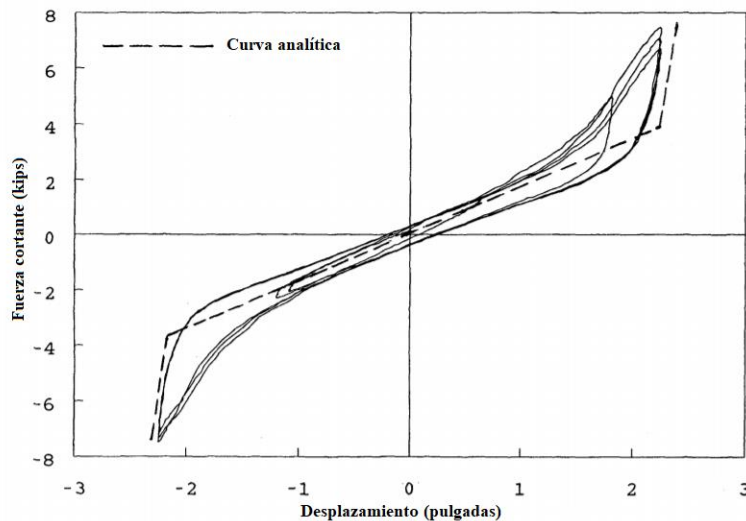
donde  $k_h$  y  $k_v$  son las rigideces horizontal y vertical del aislador respectivamente y  $k_d$  es la rigidez axial del dispositivo de restricción al alzamiento. Por lo tanto, cuando el desplazamiento horizontal total actuante ( $u_x$ ) supera al desplazamiento horizontal último admisible ( $u_d$ ) en ausencia de carga axial de tensión, es decir,  $u_x \geq u_d$ , se tiene que:

$$F_x = k_h u_d + \left[ k_h + \frac{k_v u_d^2}{h^2 + L^2 \frac{k_v}{k_d}} \right] e_x \quad (4)$$

y cuando  $u_x \leq u_d$ , se sabe que el dispositivo de control no soporta ninguna carga axial ( $P$ ); entonces, la expresión para  $F_x$  se puede simplificar como:

$$F_x = k_h u_d \quad (5)$$

Finalmente, utilizando las ecuaciones 4 y 5, se puede relacionar la fuerza cortante y el desplazamiento asociado, como se muestra en la Figura 4, dónde se grafica la curva analítica obtenida de las ecuaciones planteadas y se compara con las curvas experimentales cíclicas obtenidas en mesa vibradora con el sistema de aislamiento y la estructura a escala descrita más adelante.

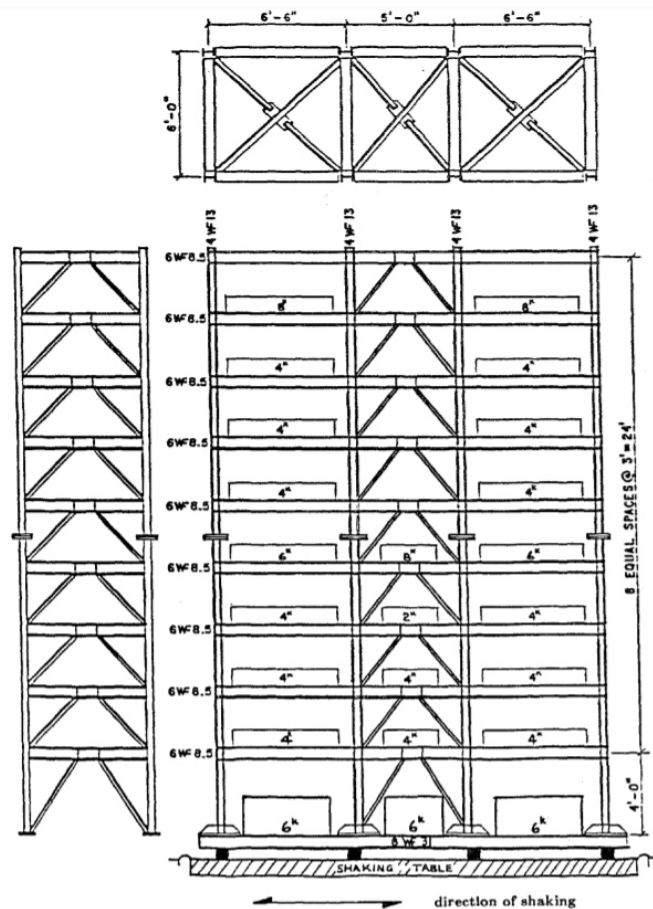


**Figura 4** Curvas analítica y experimental del aislador elastomérico con dispositivo de restricción (figura adaptada de Kelly *et al.* 1987)

## 2.2 Pruebas en mesa vibradora hechas por Kelly *et al.* (1987)

Las pruebas experimentales en mesa vibradora reportadas por Kelly *et al.* (1987) se realizaron con una estructura de acero de nueve niveles (Figura 5). Su altura total fue de 29 pies (8.84 m) y su ancho en la dirección del análisis de 18 pies (5.49 m), con una relación de aspecto de 1.61, no muy grande, pero suficiente para generar fuerzas de tensión en los aisladores de esquina. La estructura representa

un edificio de acero a escala  $\frac{1}{4}$  aproximadamente. Se estructuró con secciones tipo "I" en columnas y vigas. Se emplearon secciones tipo ángulo o "L" en los contravientos que se colocaron en los marcos centrales y transversales, así como en los elementos horizontales que simularon a los diafragmas de piso. Además, se añadió masa adicional, con bloques de concreto acomodados estratégicamente en cada nivel de la estructura, para dar un peso total entre el peso propio y bloques de concreto de 122 kips (55.34 t).



**Figura 5** Estructuración de modelo experimental. Edificio de acero de nueve niveles con sistema de aislamiento sísmico (tomado de Kelly *et al.* 1987)

El modelo no fue diseñado específicamente para estas pruebas, pero fue adaptado de un experimento previo (Kelly *et al.* 1987). El sistema de aislamiento se componía de ocho aisladores de caucho natural laminado, ubicados uno debajo de cada columna de los marcos de acero. Cada aislador contaba con un módulo de rigidez a cortante de 100 psi (7.03 kg/cm<sup>2</sup>) al 50% de la deformación por cortante, y con relación de amortiguamiento viscoso equivalente relativamente bajo, en un intervalo de entre el 5% y 7% al 50% de la deformación por cortante. Además, la rigidez horizontal de 1.6 kips/in (0.286 t/cm) al 50% de la deformación por cortante (o 1.125 pulgadas de desplazamiento) que proporcionó una frecuencia de 1.01 Hz ( $T = 0.99$  s) para el modelo aislado. Esta frecuencia era demasiado baja para

generar fuerzas de tensión en las columnas de las esquinas, ya que el sistema de aislamiento no permitía una transmisión de aceleración suficiente (Kelly *et al.* 1987).

Para aumentar la probabilidad de que el modelo experimente fuerzas de tensión, se utilizaron aisladores con núcleo de plomo en las cuatro columnas centrales. El plomo empleado tenía resistencia a la fluencia de 1500 ksi (105.46 t/cm<sup>2</sup>), que correspondía a una carga horizontal en el modelo de 1.8 kips (0.816 t) al 50% de la deformación por cortante, por lo que la contribución de rigidez efectiva era de 1.6 kips/in (0.286 t/cm). Con los cuatro aisladores con núcleo de plomo en las columnas centrales y cuatro aisladores con dispositivo de control en las esquinas, la frecuencia de aislamiento al 50% de la deformación por cortante se elevó a 1.24 Hz o  $T = 0.806$  s (Kelly *et al.* 1987). El aumento de la rigidez y la tendencia de los aisladores con núcleo de plomo a generar respuesta de los modos superiores aumentaron la probabilidad de genera fuerzas de tensión con vibraciones sísmicas moderadas.

Primeramente, el modelo empotrado en la base fue sometido a una prueba de vibración libre, donde mediante un mecanismo de tensores se impuso un desplazamiento lateral y se soltó en vibración libre hasta que regresó a su estado de reposo estático. En esta prueba se determinaron las primeras dos frecuencias naturales de vibración en base rígida (Kelly *et al.* 1987), que fueron 2.8 Hz ( $T = 0.357$  s) y 9 Hz ( $T = 0.111$  s) en el sentido longitudinal. De forma similar, se realizó la prueba en el modelo aislado, y se obtuvieron las primeras tres frecuencias naturales de vibración con valores de 1.11 Hz ( $T = 0.901$  s), 6.09 Hz ( $T = 0.164$  s) y 13 Hz ( $T = 0.077$  s).

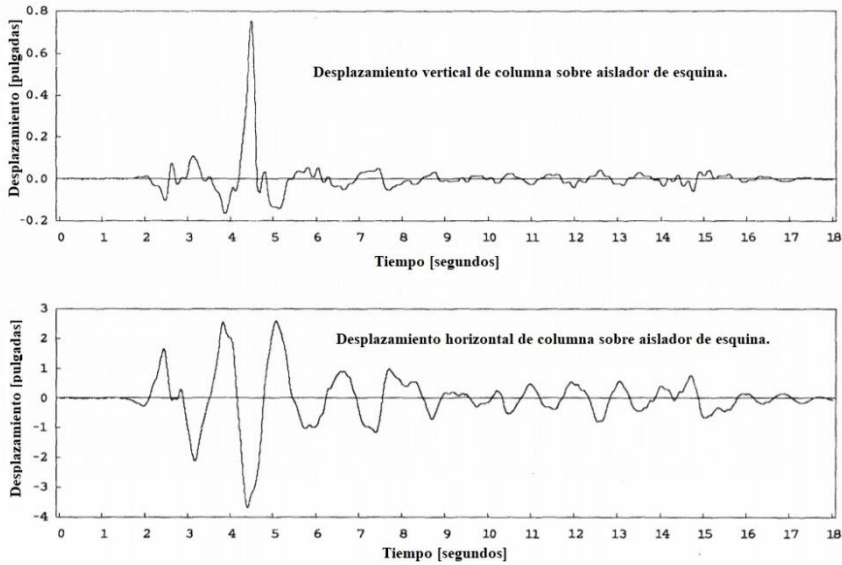
Después, para estudiar el efecto de las fuerzas de tensión en las columnas y en el sistema de aislamiento, el modelo aislado fue sometido a ocho registros de aceleración diferentes en la mesa vibradora (Kelly *et al.* 1987). Los registros seleccionados fueron representativos de sismos importantes que habían sucedido alrededor del mundo hasta ese entonces. Para fines de este trabajo de investigación, se presentan los resultados reportados por Kelly *et al.* (1987) para el mundialmente famoso registro de El Centro componente S00E, del sismo del Valle Imperial del 18 de mayo de 1940.

La estructura fue instrumentada con acelerómetros, potenciómetros lineales y transductores de desplazamiento de corriente continua, para permitir obtener registros precisos de las respuestas del modelo. Así, las pruebas en mesa vibradora consistieron en someter la estructura a las señales sísmicas, pero para tener puntos de comparación y comprobar la eficiencia del dispositivo de control de desplazamiento y restricción de tensión, se hicieron pruebas con el sistema de aislamiento incluyendo dicho dispositivo y se repitieron, pero sin incluir el dispositivo en el sistema de aislamiento (Kelly *et al.* 1987).

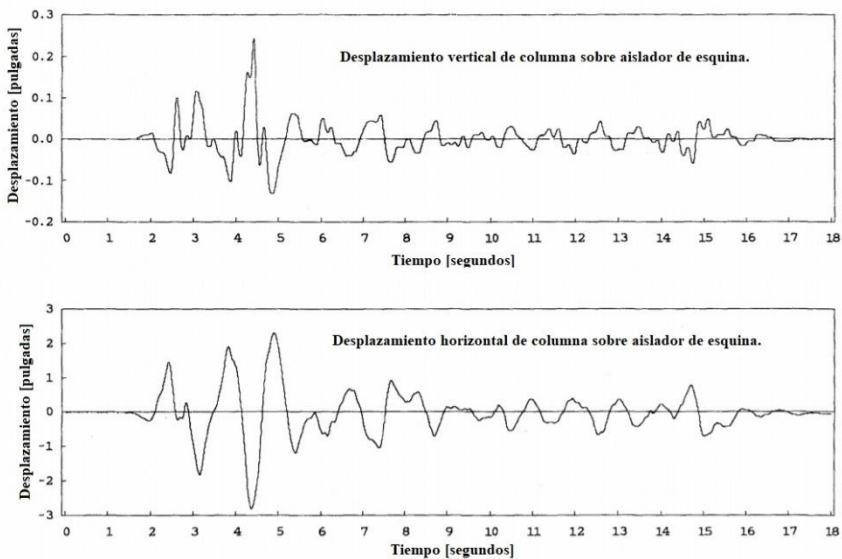
Cada registro de aceleración se aplicó escalando la aceleración máxima del terreno de manera creciente, hasta que el modelo, sin el dispositivo de restricción, presentara fuerzas de tensión en los aisladores de las esquinas. En la Figura 6 se muestran las historias de desplazamiento vertical y horizontal de una de las columnas de esquina reportadas por Kelly *et al.* (1987), donde se observa que se produjo un alzamiento significativo de la columna (0.75 pulgadas o 1.91 cm) durante la prueba de El Centro escalada a una aceleración máxima del terreno de 0.842g.



Los resultados para el modelo a escala  $\frac{1}{4}$  representarían tres pulgadas (7.62 cm) de alzamiento de las columnas de las esquinas en el edificio prototipo (Kelly *et al.* 1987), lo cual en vista de las grandes aceleraciones generadas cuando la estructura cae de nuevo en su base, es un fenómeno no deseado y que se busca evitar.



**Figura 6** Historia de desplazamientos vertical y horizontal de la columna de esquina para el registro El Centro 0.832g con el sistema de aislamiento sin el dispositivo de control (tomada y adaptada de Kelly *et al.* 1987)



**Figura 7** Historia de desplazamientos vertical y horizontal de la columna de esquina para El Centro 0.832g con el sistema de aislamiento con el dispositivo de control en los cuatro aisladores de las esquinas (tomada y adaptada de Kelly *et al.* 1987)

Después de que se completaron las pruebas en la estructura libre al alzamiento, los aisladores en las esquinas se reemplazaron por los aisladores que

contenían al dispositivo de restricción de levantamiento descrito anteriormente (Figuras 1 y 2). Luego, el modelo se sometió al mismo conjunto de registros sísmicos (Kelly *et al.* 1987). En la Figura 7 se muestran las historias de desplazamiento vertical y horizontal que ocurrieron en las esquinas del modelo. Se observa que el dispositivo no solamente evitó el levantamiento visto anteriormente (Figura 6), sino que también limitó esencialmente el desplazamiento horizontal.

Del total de pruebas realizadas, se observó que en aquéllas en las cuales el dispositivo se extendió por completo, las aceleraciones de piso máximas fueron aproximadamente el doble de las obtenidas en las pruebas de registros similares donde el dispositivo no se había instalado. Las respuestas de frecuencia más alta de la estructura no aumentaron en los momentos en que el dispositivo se extendió por completo, debido a la transición suave con la rigidez horizontal del aislador (Kelly *et al.* 1987).

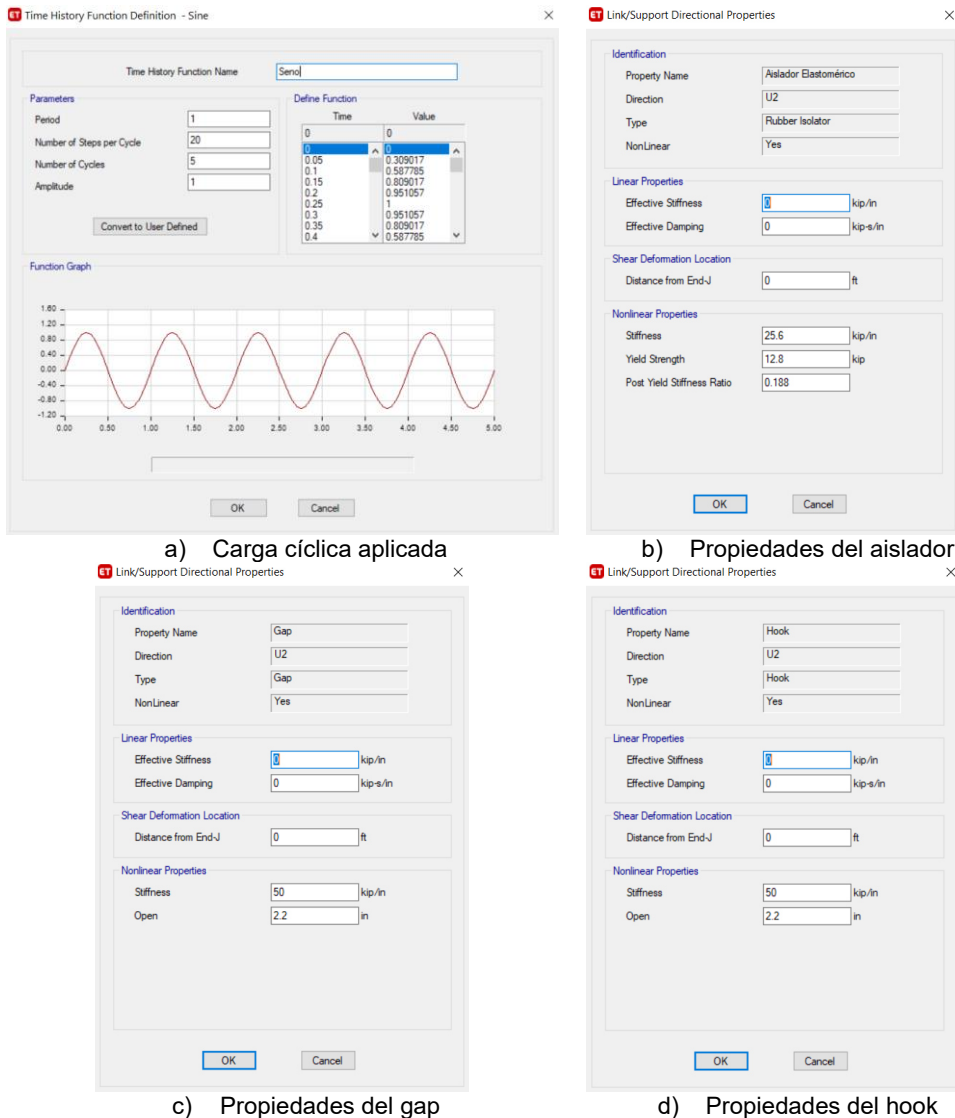
Si bien el alzamiento de la columna era la preocupación principal en las pruebas del modelo aislado, se observó que los dispositivos de restricción al alzamiento claramente podrían utilizarse también para el control de desplazamientos horizontales. De este modo, los dispositivos podrían actuar como mecanismos de “falla segura”, y estarían diseñados para trabajar solamente cuando el desplazamiento del aislador excediera el desplazamiento máximo permitido o el desplazamiento de diseño (Kelly *et al.* 1987).

### **3 MODELADO DE ELASTÓMEROS LAMINADOS CON DISPOSITIVOS DE RESTRICCIÓN AL ALZAMIENTO EN SOFTWARE COMERCIAL**

Con la intención de aportar herramientas de manera directa a los ingenieros de la práctica, en esta investigación se planteó modelar los experimentos anteriormente descritos empleando software comercial. Se eligió el software ETABS (CSI 2017), por ser uno de los más ampliamente utilizados en la práctica del diseño de estructuras de edificios en México (y todo el continente americano), dadas sus capacidades para el análisis lineal y no lineal. Además, en su librería de elementos, se dispone de modelos constitutivos que los autores consideraron que podrían representar razonablemente bien los resultados reportados en las pruebas experimentales de referencia. Por supuesto, existen otras alternativas de software comercial que los interesados pueden calibrar por su cuenta.

Así, para calibrar y simular el comportamiento histerético del aislador elastomérico con dispositivo de restricción mostrado en la Figura 4, se empleó el elemento tipo “link” del ETABS, con la constitutiva disponible para un aislador de hule o caucho (rubber isolator), y el cual se basa en un modelo matemático que describe el comportamiento del aislador elastomérico laminado (CSI 2017). Para incluir a la rigidez horizontal posterior al desplazamiento máximo permitido por el elastómero, se agregaron conectados en paralelo (mismos nodos) a dos elementos adicionales tipo link: uno tipo “gap” y otro tipo “hook” o gancho (CSI 2017). Estos elementos gap (compresión) y hook (tensión) actúan esencialmente como resortes elásticos, y en análisis no lineales, permiten definir un desplazamiento preestablecido antes de empezar a actuar con su rigidez horizontal, es decir, con la combinación de estas tres propiedades en paralelo, se simula el comportamiento del aislador con el dispositivo de restricción. Siendo X, Y y Z los ejes horizontales y

eje vertical respectivamente, de acuerdo con los ejes coordenados globales del programa ETABS (CSI 2017), el elemento “gap” se activa una vez que los desplazamientos horizontales negativos (en los ejes X y/o Y) permitidos se alcanzan, dado que es cuando se generan las fuerzas de compresión. El elemento “hook” o gancho se activa al alcanzar los desplazamientos horizontales permitidos en el sentido positivo de los ejes X y/o Y, que es cuando se generan las fuerzas de tensión.

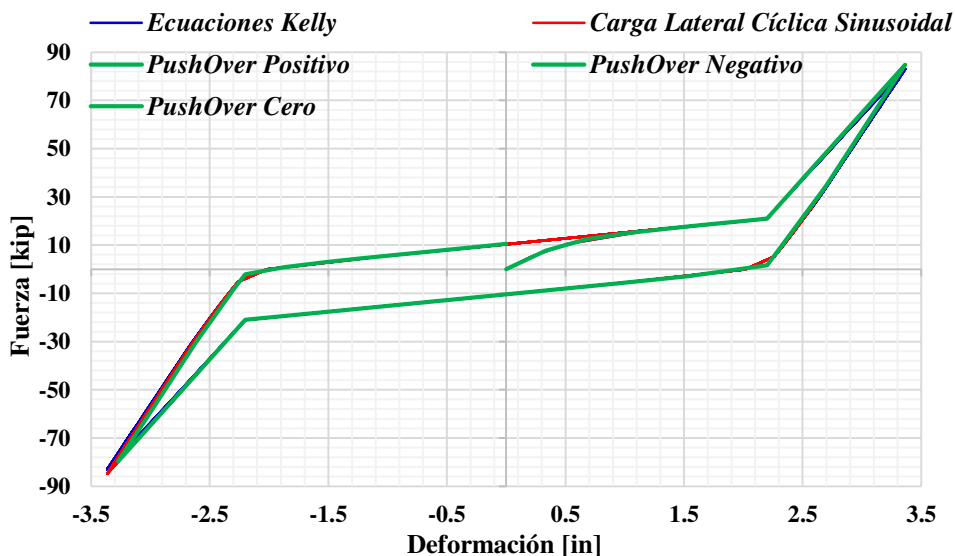


**Figura 8** Carga cíclica y propiedades mecánicas del aislador elastomérico en los grados de libertad de los ejes horizontales X e Y definidos en ETABS (CSI 2017)

A manera de ejemplo, se realizó en el ETABS un análisis dinámico no lineal ante una carga lateral  $P = 60$  kips, y se aplicó de manera cíclica con una función sinusoidal, misma que se muestra en la Figura 8a. El ejercicio se realizó proponiendo la carga lateral y las propiedades mecánicas, tanto del aislador

elastomérico laminado (rubber isolator), como del dispositivo de control de desplazamientos y restricción de tensión (gap y hook). Los valores propuestos no representaron ningún ensayo experimental en específico, ya que solamente fueron propuestos para analizar y calibrar el modelado de la curva primaria (Figura 4). En las Figuras 8b, 8c y 8d se muestran las ventanas del programa ETABS, donde se definieron las propiedades no lineales del aislador elastomérico y de los dispositivos de restricción, respectivamente.

Además del análisis dinámico no lineal con carga sinusoidal, se realizó un análisis estático no lineal "pushover", y se comprobó que con las ecuaciones desarrolladas por Kelly y colaboradores (sintetizadas anteriormente) se representara correctamente el comportamiento del aislador con el dispositivo de restricción. En la Figura 9 se muestran las curvas obtenidas en los análisis descritos. Se observa que existe una muy buena aproximación entre los resultados de todos los análisis, donde claramente el dispositivo se activa una vez que la deformación horizontal del aislador ha alcanzado las 2.2 pulgadas establecidas en las propiedades del dispositivo (Figura 8). También se observó que las curvas de histéresis son similares a aquellas reportadas por Kelly y colaboradores (Figura 4) a partir de las pruebas experimentales, por lo que con el modelado en el ETABS se obtuvieron buenos resultados.



**Figura 9** Curvas de histéresis de análisis hechos en ETABS y obtenidas mediante ecuaciones analíticas para el aislador elastomérico con dispositivo de restricción

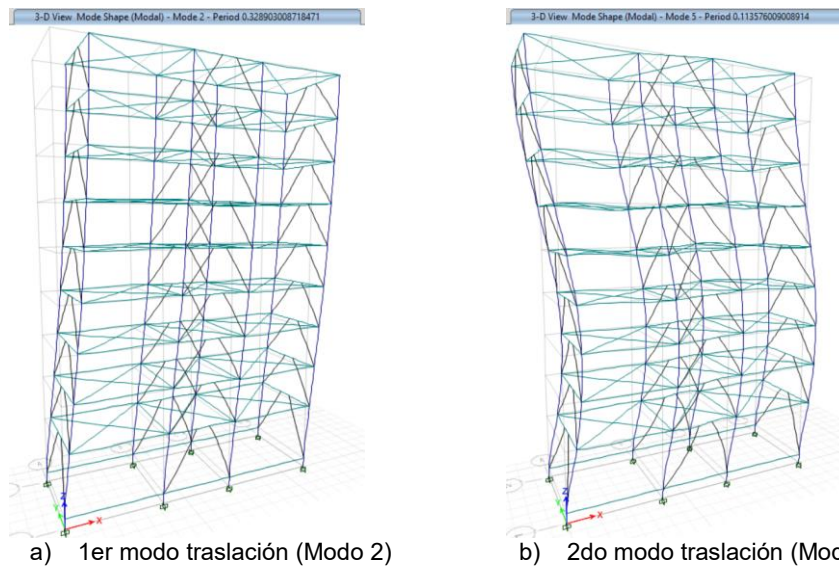
Toda vez que se confirmó la efectividad del modelado del aislador elastomérico en el ETABS con el dispositivo de restricción, se inició con la calibración del empleo de estos aisladores en ensayos en mesa vibradora con los resultados reportados por Kelly *et al.* (1987).

Se modeló la estructura de acero de nueve niveles con las secciones y la distribución de cargas presentadas en la Figura 5, complementada con la información de las secciones utilizadas en las diagonales de acero del modelo estructural de mesa vibradora, que se reportan con mayor detalle en Griffith *et al.*

(1988). Se calcularon las frecuencias y modos de vibración de la estructura en base rígida y se comparan en la Tabla 1 con las frecuencias reportadas de las pruebas en vibración libre reportadas por Kelly *et al.* (1987). En las celdas rellenas en color gris se indican las primeras dos frecuencias de vibración en el sentido longitudinal de la estructura. En la Figura 10 se presentan los correspondientes modos de vibración, con valores de 3.04 Hz y 8.805 Hz, que, comparados con aquéllos reportados por Kelly *et al.* (1987) de 2.8 Hz y 9 obtenidos en pruebas experimentales, se consideraron aceptables, lo que dio pauta para continuar con la calibración del modelo aislado.

**Tabla 1** Periodos y frecuencias modales del modelo en base rígida, obtenidos de análisis en ETABS

Modo	Dirección	Periodo (T) s	Frecuencia (f)	Frecuencia Circular ( $\omega$ )	Eigenvalores
			Hertz	rad/s	rad <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
1	Transversal	0.357	2.801	17.6006	309.7805
2	Longitudinal	0.329	3.04	19.1035	364.9422
3	Rotacional	0.266	3.756	23.5979	556.8618
4	Transversal	0.133	7.523	47.2694	2234.3917
5	Longitudinal	0.114	8.805	55.3214	3060.4587



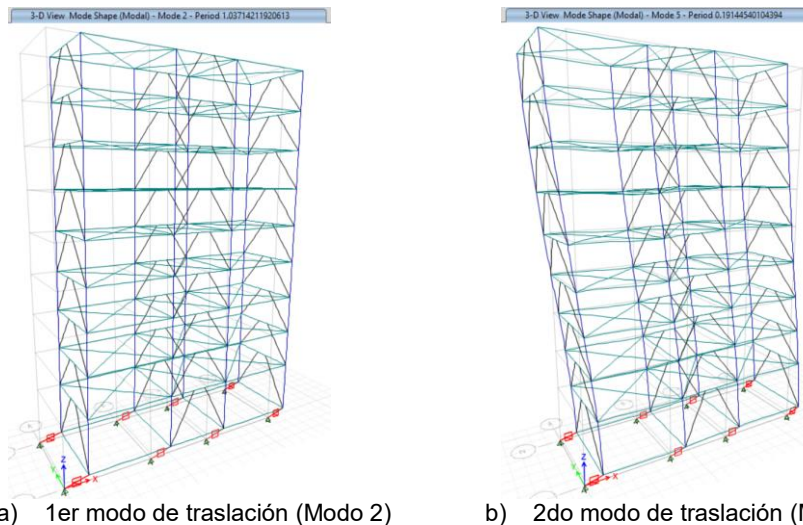
**Figura 10** Modos de vibración de traslación en la dirección longitudinal del modelo en ETABS en base rígida

El sistema de aislamiento sísmico se compone de cuatro aisladores elastoméricos con núcleo de plomo en las columnas centrales de la estructura, y cuatro aisladores elastoméricos con dispositivo de restricción en las columnas de las esquinas. Los aisladores con núcleo de plomo se discretizaron con la opción disponible en el ETABS, mientras los elastómeros con dispositivos de restricción se discretizaron como se indicó anteriormente. Se realizó un análisis modal en el ETABS, dónde se obtuvieron las frecuencias naturales de vibración reportadas en la Tabla 2. En las celdas rellenas en color gris se señalan las primeras tres

frecuencias de vibración en el sentido longitudinal de la estructura y en la Figura 11 se muestran dos modos de vibración, correspondientes a las primeras dos frecuencias reportadas, con valores de 0.964 Hz y 5.223 Hz, que comparadas con aquéllas reportadas por Kelly *et al.* (1987) de 1.11 Hz y 6.09 Hz obtenidas en pruebas experimentales, tienen una aproximación aceptable, principalmente en el modo fundamental de vibración.

**Tabla 2** Periodos y frecuencias modales del modelo con aislamiento sísmico, obtenidos de análisis en ETABS

Modo	Dirección	Periodo (T)	Frecuencia (f)	Frecuencia Circular ( $\omega$ )	Eigenvalores
		s	Hertz	rad/s	rad <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
1	Transversal	1.068	0.937	5.8851	34.6347
2	Longitudinal	1.037	0.964	6.0582	36.7014
3	Rotacional	0.947	1.056	6.6373	44.0531
4	Transversal	0.242	4.129	25.9462	673.2051
5	Longitudinal	0.191	5.223	32.8197	1077.1343
6	Rotacional	0.162	6.157	38.6826	1496.345
7	Transversal	0.117	8.52	53.5344	2865.9301
8	Local	0.092	10.849	68.1674	4646.7942
9	Local	0.09	11.149	70.0495	4906.934
10	Longitudinal	0.088	11.343	71.2717	5079.6576

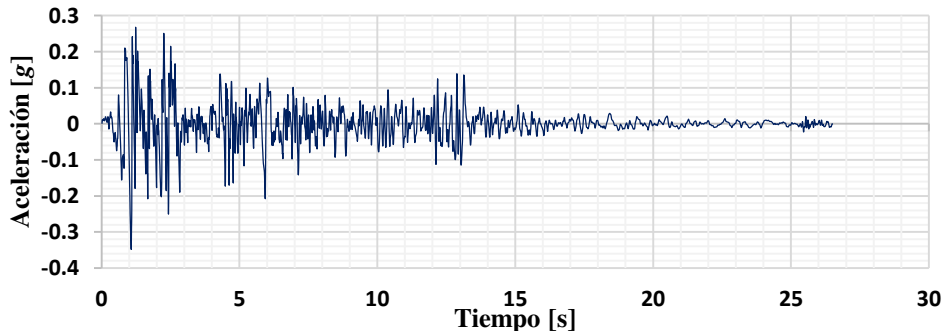


a) 1er modo de traslación (Modo 2)      b) 2do modo de traslación (Modo 5)  
**Figura 11** Modos de vibración de traslación en la dirección longitudinal del modelo en ETABS en base aislada

Con el modelo aislado calibrado, éste fue sometido al registro de aceleración de El Centro componente S00E del sismo del Valle Imperial del 18 de mayo de 1940 escalado a una aceleración máxima de 0.822g. Conforme a lo reportado por Kelly *et al.* (1987), por razones de similitud dinámica del modelo a escala en mesa vibratoria, la escala de tiempo debía reducirse a la mitad ( $\Delta t_{ensaye} = \Delta t_{registro}/2$ ). Entonces, como se observa en la Figura 12, donde se presenta el registro

de El Centro únicamente escalado en el tiempo, la duración del registro fue reducido a la mitad, de los 53 segundos que tiene de duración originalmente, a 26.5 segundos. Se muestra en la Figura 12 el registro original, sin modificar las aceleraciones; por ello, la aceleración máxima ahí observada es  $a_{max} = 0.35 g$ ., con la finalidad de compararlo directamente con el reportado en Kelly *et al.* (1987).

Comprobado ya que el escalamiento en frecuencia era adecuado, se realizaron entonces análisis dinámicos paso a paso del modelo aislado sometido al registro de El Centro cuando se escala la aceleración máxima al objetivo  $a_{max} = 0.832 g$ . Por ello, el registro de aceleraciones mostrado en la Figura 12 fue escalado 2.377 veces, es decir, se utilizó un factor de escala de 2.377 para amplificar las aceleraciones. Cabe señalar que fue para esta aceleración máxima  $a_{max} = 0.832 g$  cuando se presentaron fuerzas de tensión en los aisladores de las esquinas (Kelly *et al.* 1987). Se realizó un análisis dinámico paso a paso no lineal de integración directa, donde el comportamiento bilineal de los aisladores se idealizó de la siguiente manera. En los aisladores elastoméricos con dispositivo de restricción, la primera pendiente de rigidez fue la correspondiente a la rigidez horizontal del caucho, mientras que la segunda pendiente de rigidez fuera la proporcionada por el dispositivo de control de desplazamientos y restricción de tensión. De manera similar, para los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, la primera pendiente de rigidez fue la correspondiente a la rigidez del núcleo de plomo y, una vez que éste fluye, entra en la segunda pendiente de rigidez, correspondiente a la rigidez horizontal del caucho.

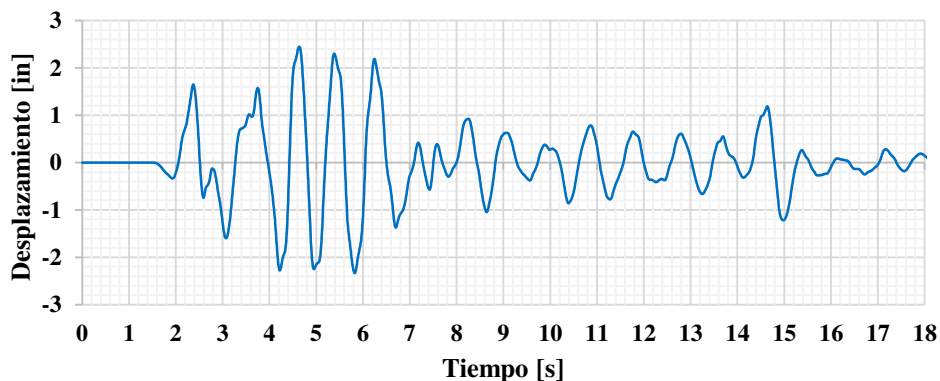


**Figura 12** Registro de aceleración original de El Centro 1940 S00E con  $PGA = 0.35 g$ . Escalado a la mitad del tiempo de su duración original, según se empleó en las pruebas de mesa vibradora reportadas por Kelly *et al.* (1987)

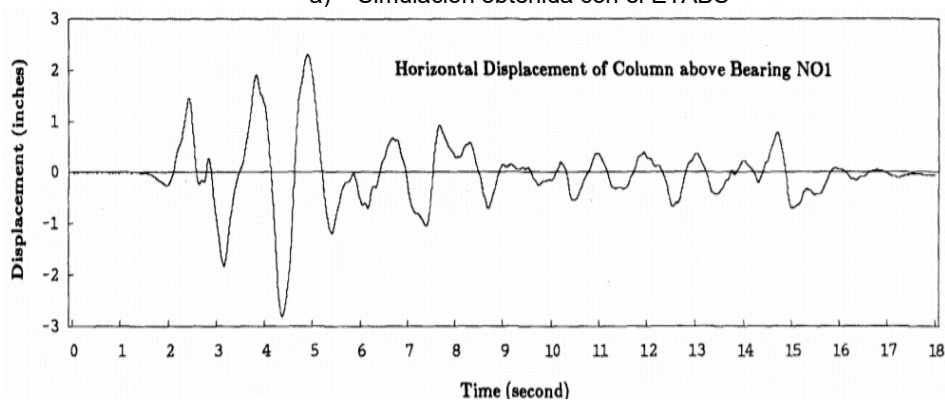
**Tabla 3** Valores experimentales proporcionados y analíticos propuestos para modelado de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo

Datos de Kelly <i>et al.</i> (1987) y Griffith <i>et al.</i> (1988)		Ajuste bilineal propuesto	
$G_{50\%hule}$ (psi)	100	$D_y$ (in)	0.818
$k_{50\%hule}$ (kips/in)	1.60	$V_y$ (kips)	3.109
$D_{50\%}$ (in)	1.125	$D_{max}$ (in)	2.25
$\tau_{pb}$ (psi)	1467	$V_{max}$ (kips)	5.40
$Q = V_y y_{pb}$ (kips)	1.80	$k_1$ (kips/in)	3.80
$D_{pb}$ (in)	1.25	$k_2$ (kips/in)	1.60
$h_{tot}$ (in)	4.875		
$h_{eff}$ (in)	2.25		
Ancho y largo del aislador (in)	6		

Este tipo de análisis requiere datos técnicos de los aisladores, mismos que no se indican con precisión en el reporte de Kelly *et al.* (1987). Sin embargo, tomando algunos valores comentados por ellos, proponiendo algunos otros valores con base en los datos proporcionados en el informe (Tabla 3) y, con base en propuestas para ajustes bilineales para aisladores con núcleo de plomo (por ejemplo, Naeim y Kelly 1999, Tena 2017), se definieron los valores requeridos (Tabla 3) por el modelo constitutivo del ETABS. Con toda esta información, se realizó el análisis dinámico no lineal correspondiente. En la Figura 13 se muestra la aproximación obtenida para la historia de desplazamientos horizontales de la columna de esquina, donde se compara con la reportada experimentalmente. Aunque el ajuste obtenido no es excelente, pues existen diferencias en las frecuencias (desde el modelo en base rígida) y la sincronía entre las curvas, para fines prácticos se considera aceptable, pues se identifican bien los picos y bastante razonablemente los valores máximos. Además, hay que tomar en cuenta que el análisis se realizó ignorando los filtros específicos que se aplicaron al registro empleado realmente en mesa vibradora, pues éstos no fueron reportados por Kelly *et al.* (1987).



a) Simulación obtenida con el ETABS

b) Reportada por Kelly *et al.* (1987)

**Figura 13** Historia de desplazamientos horizontales en columna de esquina, para prueba de registro sísmico El Centro S00E 0.832 g, obtenida en análisis no lineal de integración directa en ETABS y su comparación con la reportada por Kelly *et al.* (1987)

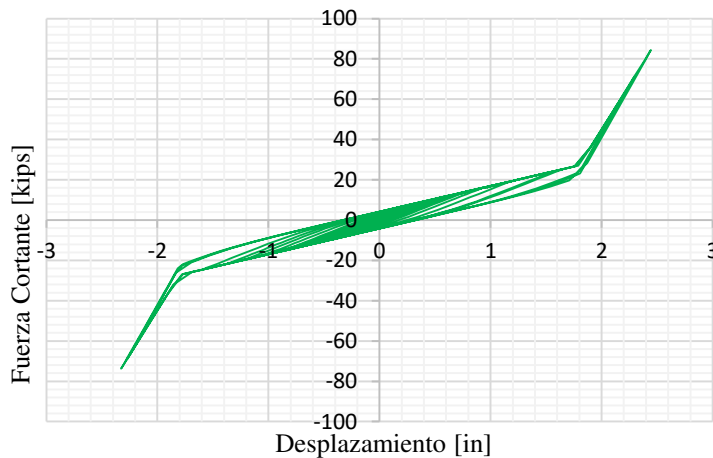


Para esclarecer un poco más los resultados mostrados en la Figura 13, en la Tabla 4 se muestra la comparativa de los valores máximos y mínimos obtenidos de la historia de desplazamientos de la prueba analítica comparados con aquéllos reportados gráficamente por Kelly *et al.* (1987) de la prueba experimental.

**Tabla 4** Comparativa de valores máximos y mínimos obtenidos de la prueba analítica y la experimental reportada por Kelly *et al.* (1987)

Prueba	Desplazamiento (in)	
	Máximo	Mínimo
<b>Analítica</b>	2.45	-2.33
<b>Experimental (Kelly <i>et al.</i> 1987)</b>	2.35	-2.88

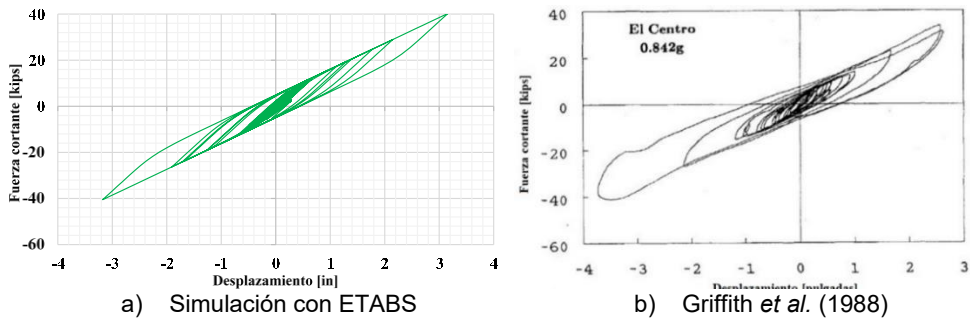
Asimismo, en la Figura 14 se muestra la curva de histéresis de uno de los aisladores de esquina, modelado con el dispositivo de restricción al levantamiento, donde se observa el comportamiento no lineal del mismo, lo que nos indica que dicho dispositivo influye en el comportamiento global de la estructura restringiendo el posible levantamiento y volteo de la estructura debido a las demandas de aceleración impuestas por el registro sísmico en su base.



**Figura 14** Curva de histéresis de un aislador modelado con dispositivo de restricción al levantamiento ubicado en una columna de esquina de la estructura, para el modelo sometido a El Centro 0.832 g.

Finalmente, en virtud de que algunos valores referentes a los aisladores elastoméricos fueron tomados de lo que se reportó en Griffith *et al.* (1988), se decidió realizar algunas simulaciones comparativas con las pruebas experimentales de ese proyecto. Dado que el modelo estructural utilizado por Griffith *et al.* (1988) fue el mismo que utilizaron Kelly *et al.* (1987), el análisis en ETABS no requirió de grandes cambios. En los experimentos de Griffith *et al.* (1988), el sistema de aislamiento estaba compuesto por cuatro aisladores elastoméricos con núcleo de plomo ubicados bajo las columnas centrales, y cuatro aisladores elastoméricos (sin dispositivo de restricción) bajo las columnas de las esquinas. El registro sísmico de El Centro se escaló también 2.406 veces en amplitud de aceleraciones para alcanzar una aceleración máxima  $a_{max} = 0.842 g$ . Se realizó entonces un análisis dinámico paso a paso no lineal de integración directa con estas modificaciones en

los aisladores de esquina, modelando los aisladores elastoméricos sencillos con rigidez elástica, asignándole los valores mencionados anteriormente, y los aisladores con núcleo de plomo con comportamiento bilineal con los valores reportados en la Tabla 3. En la Figura 15a se muestra la curva de histéresis global del sistema de aislamiento, que comparada con la experimental mostrada en la Figura 15b, se aprecia un ajuste relativamente bueno, debido a que se alcanzaron valores de desplazamiento y fuerza cortante muy similares a los reportados en las pruebas experimentales. Además, en la Tabla 5 se reportan la comparación de los resultados de esta aproximación.



**Figura 15** Curva de histéresis global del sistema de aislamiento para el modelo sometido a El Centro 0.832 g. Comparación de lo obtenido con el modelo del ETABS con lo reportado experimentalmente por Griffith *et al.* (1988). En este modelo, se usaron elastómeros con corazón de plomo debajo de cada columna central y elastómeros laminados sin dispositivos de restricción al alzamiento en las esquinas.

**Tabla 5** Comparación de resultados de pruebas experimentales contra resultados analíticos obtenidos con los modelos del ETABS

Mesa Vibradora		ETABS		Aproximación	
$D_{exp}$ (in)	$V_{exp}$ (kips)	$D_{max}$ (in)	$V_{max}$ (kips)	$D_{exp}/D_{max}$	$V_{exp}/V_{max}$
3.78	39.5	3.18	44.88	1.189	0.88

## 4 COMENTARIOS FINALES

La construcción de edificios esbeltos y de gran altura es cada vez más frecuente en nuestras ciudades por el alto costo de los terrenos disponibles. Esto representa un reto importante en zonas de alto peligro sísmico, dado que se inducen fuerzas axiales efectivas de tensión y de compresión muy importantes en las columnas y, en el caso de estructuras aisladas sísmicamente, en los aisladores de base. Entonces, será cada vez más frecuente intentar dar soluciones seguras a proyectos donde se presenten grandes demandas de tensión y/o fuerzas de alzamiento en los aisladores de esquina y de perímetro.

Dado que los aisladores elastoméricos tienen una muy reducida capacidad a tensión, y además pueden experimentar una falla frágil por el fenómeno de cavitación del hule, no es conveniente entonces que resistan estas demandas de tensión o de alzamiento por sí solos. Por ello, será necesario implantar aisladores que dispongan de dispositivos que restrinjan su desplazamiento vertical y que hayan sido diseñados expreso para ello.

Intentando aportar una solución práctica para su modelado analítico en apoyo del diseño estructural formal, en este trabajo se presentó una propuesta de cómo se puede modelar razonablemente un dispositivo de restricción al alzamiento para elastómeros laminados probado exitosamente en mesa vibradora por Kelly *et al.* (1987), combinando el uso de distintos elementos tipo link (resortes lineales y no lineales) disponibles en la librería del programa ETABS. El modelado propuesto se calibró y comparó con resultados de ensayos en mesa vibradora reportados por Kelly *et al.* (1987), obteniéndose una aproximación bastante razonable para fines de uso en la práctica profesional. De esta manera, los proyectistas podrán incluir, sin muchas complicaciones, a estos dispositivos en sus modelos de diseño, cuando valoren que existan demandas de fuerzas de tensión y de alzamiento que no garanticen la estabilidad de elastómeros laminados convencionales (de hule natural, de alto amortiguamiento, con corazón de plomo, etc.).

## AGRADECIMIENTOS

Dimas Francisco Parra García agradece la beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (Conacyt), que le permitió involucrarse en este proyecto de investigación en el desarrollo de su tesis de maestría en el Posgrado de Ingeniería Estructural de la UAM Azcapotzalco. Se agradecen los comentarios del árbitro del artículo, que permitieron a los autores mejorar el entendimiento del mismo.

## REFERENCIAS

1. CSI (2017), *ETABS V18.1.1 Analysis reference manual*, Computers and Structures, Inc. Berkeley, California.
2. Dorfmann, A. y S. L. Burtcher (2000), "Aspects of cavitation damage in seismic bearings", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 573-579.
3. Gent, A. N. y P. B. Lindley (1959), "Internal rupture of bonded rubber cylinders in tension", *Proceedings of the Royal Society A*; Vol. 249, No. 1257, pp. 195-205,
4. Griffith, M. C., I. D. Aiken y J. M. Kelly (1988), "Experimental evaluation of seismic isolation of a 9-story braced steel frame subject to uplift", *Report No. UCB/EERC-88/05*, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California at Berkeley, mayo.
5. Griffith, M. C., I. D. Aiken y J. M. Kelly (1990), "Displacement control and uplift restraint for base-isolated structures", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, No. 4, pp. 1135-1148.
6. Hino, J., S. Yoshitomi, M. Tsuji e I. Takewaki (2008), "Bound of aspect ratio of base-isolated buildings considering nonlinear tensile behavior of rubber bearing", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 30, No. 3, pp. 351-368.
7. Kelly, J. M., M. C. Griffith e I. D. Aiken (1987), "A displacement control and uplift restraint device for base isolated structures", *Report No. UCB/EERC-87/03*, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California at Berkeley, abril.

8. Kelly, J. M. (1993), *Earthquake-resistant design with rubber*, primera edición, Springer-Verlang, Nueva York.
9. Kelly, J. M. y S. M. Thakirov (2007), "Tension buckling in multilayer elastomeric isolation bearings", *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 2, No.8, pp. 1591-1605.
10. Kelly, J. M. y M. R. Marsico (2013), "Tension buckling in rubber bearings affected by cavitation", *Engineering Structures*, Vol. 56, pp. 656-663.
11. Kumar, M., A. S. Whittaker y M. C. Constantinou (2015), "Experimental investigation of cavitation in elastomeric seismic isolation bearings", *Engineering Structures*, Vol. 101, pp. 290-305.
12. Li, H.-N. y X. X. Wu (2006), "Limitations of height-to-width ratio for base-isolated buildings under earthquake", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 15, pp. 277-287.
13. Mano, T. e I. Mangerig (2015), "Determination of tensile capacity of elastomeric bearings", *Structural Engineering International*, Vol. 25, No. 2, pp. 134-140.
14. Mazza, F. y M. Mazza (2020), "Influence of elastomeric bearings in tension on the seismic performance of base-isolated R.C. buildings", *Applied Sciences*, Vol. 11, Artículo 82, pp. 1-19.
15. Naeim, F. y J. M. Kelly (1999), *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
16. Pond, T. J. (1995), "Cavitation in bonded natural rubber cylinders repeatedly loaded in tension", *Journal of Natural Rubber Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 14-25.
17. Ryan, K. L. y A. K. Chopra (2006), "Estimating seismic demands for isolation bearings with building overturning effects", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No. 7, pp. 1118-1128.
18. Shen, C., P. Tan, J. Cui, Y. Ma y X. Huang (2016), "Critical tension–shear load of elastomeric seismic isolators: An experimental perspective", *Engineering Structures*, Vol. 121, pp. 42-51.
19. Shen, C.-Y., Y.-Y. Chen, X.-Y. Huang, P. Tan y Y.-H. Ma (2019), "Numerical and experimental modeling of a new anti-tension equipment for high-rise isolation buildings", *Engineering Structures*, Vol. 179, pp. 129-138.
20. Takaoka, E., Y. Takenaka y A. Nimura (2011), "Shaking table test and analysis method on ultimate behavior of slender base-isolated structure supported by laminated rubber bearings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 40, pp. 551-570.
21. Takayama, M., K. Oka y R. Kato (2004), "The tensile tests of natural rubber bearings focused on the effect of the steel flange plates", *Memorias, 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, Paper No. 311, August.
22. Tena, A. (2017), "Diseño sísmico simplificado de estructuras con muros de mampostería aisladas sísmicamente", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-33.
23. Xu, H., W. He, W. Liu, K. Ye y C. Ren (2021), "Shaking table test and investigation of rocking effect in a high-rise isolated structure", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, Vol. 174, No. 8, pp. 637-654.
24. Zhou, Y., P. Chen, X. L. Xu y X. H. Li (2017), "A tension-resistant device in base isolation", *Memorias, 16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, Artículo No. 3033, pp. 1-12, enero.