

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE HISTÉRESIS EN UN AISLADOR DE POLIURETANO APLICADO A MODELOS ESTRUCTURALES SIMULADOS EN LA MESA DE VIBRACIÓN SAILHAM

ANALYSIS OF HYSTERESIS PROPERTIES IN A POLYURETHANE INSULATOR APPLIED TO SIMULATED STRUCTURAL MODELS ON THE SAILHAM SHAKE TABLE

Recibido: 20/06/2022 - Aceptado: 11/01/2023

Ramiro Humberto Erazo Hernández

Magister en calidad, seguridad y ambiente - Universidad Central del Ecuador

Docente de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador

rerazo171@puce.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-7199-5816>

Brian Oswaldo Cando Erazo

Ingeniero Civil - Universidad Central del Ecuador

Jefe (E) de Obras Civiles GADMT

brian.cando@gmtulcan.gob.ec

<https://orcid.org/0000-0003-4746-3961>

Cómo citar este artículo:

Erazo, R. & Cando, B. (Enero - Junio de 2022). Análisis de las propiedades de histéresis en un aislador de poliuretano aplicado a modelos estructurales simulados en la mesa de vibración Sailham. Sathiri (18)1, 242-254. <https://doi.org/10.32645/13906925.1202>



Resumen

El actual estudio investigativo tiene como objetivo encontrar las propiedades de histéresis de un material que permita asemejar el comportamiento de un aislador, el mismo que será incorporado a tres modelos experimentales de diferente material y configuración. Las respuestas de aceleración fueron determinadas de manera experimental, mediante la simulación en la mesa de vibración Sailham para cuatro eventos sísmicos de impulsión y cuatro eventos de naturaleza de subducción, cada uno con dos etapas. Para medir las respuestas de aceleración se colocó un acelerómetro en cada dintel del piso de aislación. Con los datos obtenidos de la experimentación se analizan y determinan a través de procesos matemáticos, los desplazamientos y esfuerzos, para de esta manera elaborar la curva de histéresis de los aisladores de cada modelo experimental. De la curva de histéresis se obtuvieron las propiedades del aislador de poliuretano como son el amortiguamiento y la rigidez efectiva, y, con ello analizar la teoría de aislación sísmica.i.

Palabras Claves: Propiedades de histéresis, aislador, curva de histéresis, poliuretano.

Abstract

The current investigative study aims to find the hysteresis properties of a material that allows to resemble the behavior of an insulator, it will be incorporated into three experimental models of different material and configuration. The acceleration responses were determined experimentally, by simulating on the Sailham shake table for four thrusting seismic events and four subduction events, each with two stages. To measure the acceleration responses, an accelerometer was placed on each lintel of the isolation floor. With the data obtained from the experimentation, the displacements and forces were determined through mathematical processes, in order to elaborate the hysteresis curve of the insulators of each experimental model. From the hysteresis curve, the properties of the polyurethane insulator were obtained, such as damping and effective stiffness, and with this, analyze the theory of seismic isolation.

Keywords: Hysteretic properties, isolator, hysteresis curve, polyurethane.

Introducción

Durante mucho tiempo, alrededor de mundo se han realizado varios estudios enfocados a los efectos que producen los sismos en viviendas y edificios de diferentes alturas. Para comprender estos fenómenos en el campo de la construcción, se han venido desarrollando herramientas tecnológicas, que permitan comprender el comportamiento y los efectos de los sismos tanto de manera experimental como teórica.

En nuestro país, la alta probabilidad de ocurrencia sísmica es latente, debido a procesos de subducción y por activación de fallas geológicas locales, por lo que es importante realizar investigaciones sobre la naturaleza sismo resistente de las estructuras.

Generalmente los sismos superficiales son los que causan mayor daño, como resultado de esto se tiene que la Costa Ecuatoriana posee mayor peligrosidad sísmica, seguida por la Sierra y el Oriente. Por lo tanto, desde el punto de vista sísmico no es mismo construir en Esmeraldas, donde la peligrosidad sísmica es alta, que en el Tena que tiene una menor amenaza sísmica. (Aguilar, R., 2008).

En países como Estados Unidos y Japón se tuvieron las primeras experimentaciones de implementación de sistemas de aislación sísmica en estructuras, y estas construcciones tuvieron un buen comportamiento en los terremotos de Northridge (Estado Unidos) en 1994 y Kobe (Japón) en 1995. En la actualidad, Japón cuenta con más de 2500 construcciones con sistemas de aislación sísmica mientras que Estados Unidos con alrededor de 200. (Cámara de la Construcción de Chile, 2011)

Existen técnicas como la aislación sísmica que consiste en desacoplar la estructura de la subestructura, para ello se utilizan los dispositivos llamados aisladores que se ubican en partes específicas, los cuales, permiten reducir las demandas de aceleración y desplazamiento producidas por los movimientos sísmicos, en lugar de tratar de incrementar la resistencia o ductilidad de la edificación, y eso es lo que se tratará de comprobar en este estudio mediante la experimentación en la mesa de vibración.

Una estructura con aislación sísmica es más segura que una estructura fijada al suelo, puesto que la incorporación de estos sistemas limita la energía que transfiere el sismo, reduciendo considerablemente los esfuerzos y deformaciones en una edificación.

La presente investigación estará enfocada en elaborar modelos estructurales a los cuales se les incorporará un sistema de aislación sísmica, a los mismos que se les someterá a varios eventos de determinada magnitud, simulados en la mesa de vibración Sailham, para analizar la teoría de aislación sísmica.

Fundamentación teórica

La aislación sísmica al igual que un elemento de una estructura sismorresistente se basa en el principio de introducción de la deformación plástica en las mismas y como administrar esta deformación. El objetivo de un sistema de aislación sísmica es proporcionar medios adicionales de disipación de la energía, reduciendo así la aceleración transmitida a la superestructura (Zellat, 2015).

La incorporación de aisladores sísmicos a una estructura genera cambios en las propiedades dinámicas. El uso de aisladores elastoméricos permite aprovechar la flexibilidad de un material similar al caucho para conseguir una baja rigidez lateral, pero se lo combinan con planchas de acero para con ello elevar la rigidez vertical. Al ser flexible el material se produce también un aumento en el período fundamental de la estructura (Korswagen et al., 2012).

A los altos períodos de vibración, corresponden valores bajos de aceleraciones, por lo que las fuerzas inducidas por el sismo sobre la estructura disminuyen significativamente. Sin embargo, las deformaciones se incrementan, pero éstas se concentran en los aisladores sísmicos, por lo que las deformaciones en la superestructura son pequeñas. Los aisladores también producen un efecto de amortiguamiento importante que contribuye a disipar la energía introducida por el sismo.

Para poder determinar las propiedades del aislador es importante elaborar la curva de histeresis la misma que permitirá saber la fuerza máxima que podrá soportar ese material para poder deformarse ante la acción de esa fuerza y recuperar su estado original.

Los aisladores elastoméricos son dispositivos que permiten grandes deformaciones laterales. Poseen una forma cilíndrica con capas alternas de material de goma de origen natural o sintético y placas de acero unidas entre sí mediante un proceso de vulcanización. Estos dispositivos poseen una gran resistencia ante las cargas verticales de la estructura, por efecto de las capas de acero que restringen las deformaciones excesivas por abultamiento de las capas de goma y no se dan efectos en los desplazamientos horizontales (Auqui, 2010).

Las propiedades mecánicas de los aisladores son verificadas mediante ensayos de laboratorio y entregadas al diseñador o al propietario. Con el fin de limitar también el movimiento relativo y disipar energía, los aisladores deben generar altos valores de amortiguamiento. Para ello, se incluyen núcleos de plomo que admiten grandes deformaciones y pueden producir un alto amortiguamiento, el cual varía en función del diámetro del núcleo de plomo (Genatios y Lafuente, 2016).

“El plomo es utilizado principalmente por su comportamiento elastoplástico, su capacidad de mantener la resistencia durante múltiples ciclos de deformaciones plásticas, además de los altos valores de amortiguamiento que se consiguen, los cuales pueden llegar al 25% o inclusive al 30% del amortiguamiento crítico” (Chopra, 2011)

A partir de la curva de histeresis se puede obtener el factor de amortiguamiento del aislador que es una relación entre la energía disipada y la energía elástica, así como también la rigidez efectiva que está definida por el radio de curvatura de la superficie cóncava, como por la deformación lateral.

En general, los espectros de respuesta se calculan por medio de la integración de la ecuación de movimiento en el tiempo, de una serie de sistemas de un solo grado de libertad, de las cuales se obtiene las cantidades de respuesta máxima en desplazamiento, velocidad o aceleración (Bermeo, 2016).

Objetivos

Dentro de la investigación experimental realizada, se plantearon los siguientes objetivos, y en base a ellos determinar las propiedades de histéresis en un aislador de poliuretano aplicado a modelos estructurales simulados en la mesa de vibración Sailham, que nos permitirá analizar si con la presencia de estos elementos estructurales se conseguirá una disminución considerable de las demandas de aceleración.

- Elaborar modelos estructurales de base empotrada, así como un sistema de aislación sísmica para éstos.
- Ensayar en la mesa de vibración Sailham, los modelos estructurales construidos con base empotrada y con aisladores sísmicos, para determinar su comportamiento dinámico.
- Determinar las aceleraciones, períodos y desplazamientos máximos obtenidos de los

ensayos en la mesa de vibración Sailham de los modelos estructurales construidos con base empotrada y con aisladores sísmicos.

- Efectuar un análisis en el tiempo de cada modelo estructural con y sin aislación.
- Comparar los resultados obtenidos del comportamiento que presentan los modelos estructurales con aislación y sin aislación.

Como Hipótesis se plantea que la incorporación de aisladores sísmicos de base en los modelos estructurales influirá positivamente en el comportamiento dinámico de la estructura, disminuyendo considerablemente las demandas de aceleración.

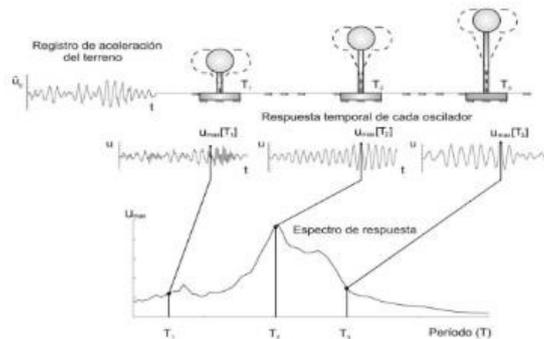


Figura 1. Determinación de un espectro de respuesta

Fuente: (Torres, L., 2010)

Al dar una gran importancia al Sismo, esta se definiría como: un sismo es un movimiento vibratorio producido por pérdida de estabilidad de la masa de la corteza terrestre. Se establece que cuando este movimiento llega a la superficie y se propaga, se producen los terremotos. Su propagación es de forma concéntrica y tridimensional. El punto donde se pierde la estabilidad de masas de corteza se llama hipocentro, a partir de ahí se generan las ondas sísmicas (Alavi y Krawinkler, 2000).

Estudio experimental

Para la presente investigación de tipo experimental, se realizaron tres modelos estructurales, dos de metal y uno de madera, los mismos que tenían como característica particular la de no ser tan rígidos, para de este modo tener una mejor visualización del movimiento generado por la simulación de un evento sísmico.



Figura 2. Dimensiones modelo 1 de metal



Figura 3. Dimensiones modelo 2 de madera

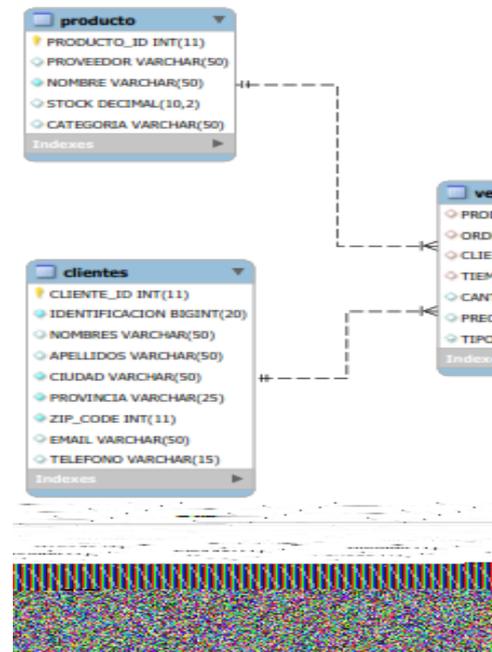


Figura 4. Dimensiones modelo 3 de metal

Con el material de poliuretano se elaboraron varios aisladores de base que se incorporarán a los modelos estructurales. Este material fue seleccionado por tener la característica de ser lo bastante flexible, para tener un buen comportamiento ante a la acción de varios eventos sísmicos y a la vez, ser lo suficientemente resistente para soportar el peso de cada uno de los modelos estructurales.

Tabla 1.

Dimensiones de los aisladores usados en los modelos experimentales

MODELO	VANOS	DIMENSIONES DEL AISLADOR	
		ALTO	DIÁMETRO
Modelo 1 (Metal)	2 Vanos	8 cm	5 cm
Modelo 2 (Madera)	2 Vanos simétricos	4 cm	2,5 cm
Modelo 3 (Metal)	1 Vano	8 cm	5 cm



Figura 5. Aisladores de poliuretano

Los modelos estructurales con aisladores sísmicos, fueron sometidos a la acción de cuatro sismos impulsivos y cuatro sismos por subducción, con dos estaciones cada uno, simulados en la máquina agitadora de simulación sísmica Sailham, y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 2.

Sismos simulados en la mesa de vibración

SISMO	TIPO	ESTACIÓN
Kobe, Japón 1995	Impulsivo	Port Island (0 m)
		Takatori
Loma Prieta 1989	Impulsivo	Treasure Island
		Los Gatos - Lexington Dam
Northridge 1994	Impulsivo	Newhall - Fire Sta
		Jensen Filter Plant Generator
Nueva Zelanda 2011	Impulsivo	Chritchchurch Hospital
		Shirley Library
Maule 2010	Subducción	Angol
		Constitución
Muisne 2016	Subducción	Manta
		Pedernales
México 1985	Subducción	Caleta de Campos
		Chilipancingo
México 2014	Subducción	Petatlán
		San Luis de Loma

Resultados

Los resultados obtenidos de la experimentación fueron los registros de aceleración, medidos en el piso de aislación de los modelos estructurales a través de un acelerómetro.



Figura 6. Componentes de la mesa de vibración

A partir de los resultados de aceleración, se obtuvieron los desplazamientos a través de método de la doble integración, el filtrado de datos de la señal entre 0,1 a 25 Hz y la corrección de la línea base con el programa SeismoSignal.

De igual manera, se obtuvo la componente de la fuerza mediante la multiplicación de la masa del modelo por los datos de aceleración obtenidos de la mesa de vibración, dividido para el número de aisladores.

Dentro de la similitud de escalas para modelos experimentales y bajo cargas dinámicas, tenemos que “al aplicar adecuadamente las leyes de escala, es posible inferir el comportamiento de una estructura a partir de la respuesta de un modelo similar cuyas dimensiones están escaladas por un factor β . Sin embargo, en algunos casos, por ejemplo, en el de las estructuras sensibles a la velocidad de deformación bajo cargas dinámicas, estas leyes se distorsionan, limitando severamente este enfoque” (Alves y Oshiro, 2006)

Con los datos desplazamiento y fuerza de los eventos sísmicos de cada modelo se procedió a dibujar la curva de histéresis.

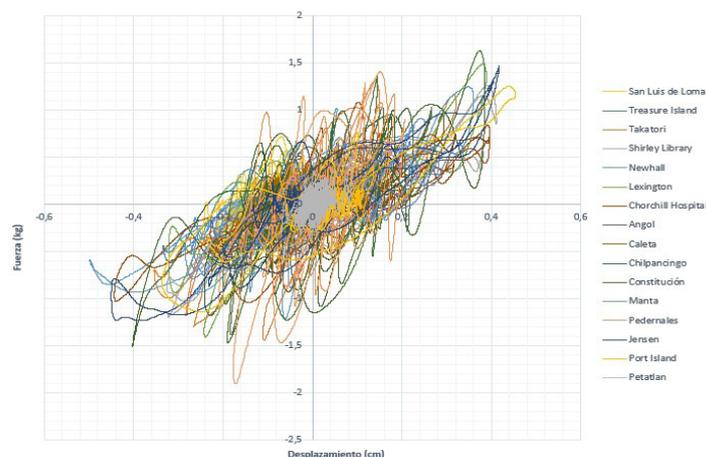


Figura 7. Curva de histéresis de los aisladores usados en el modelo 1

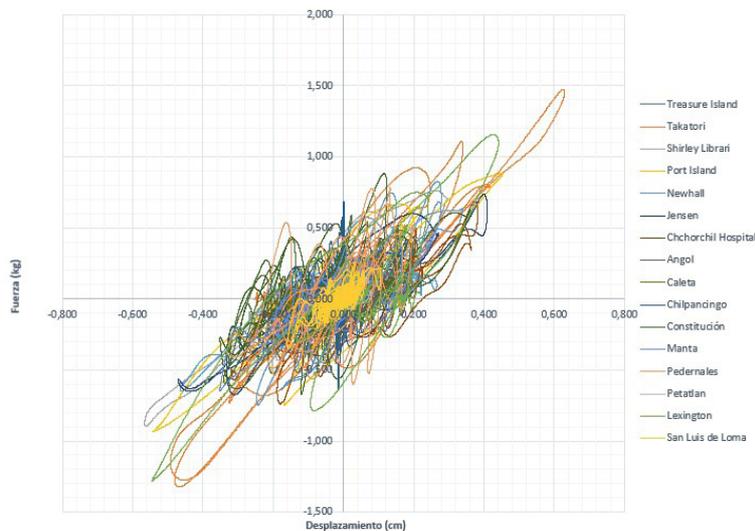


Figura 8. Curva de histéresis de los aisladores usados en el modelo 2

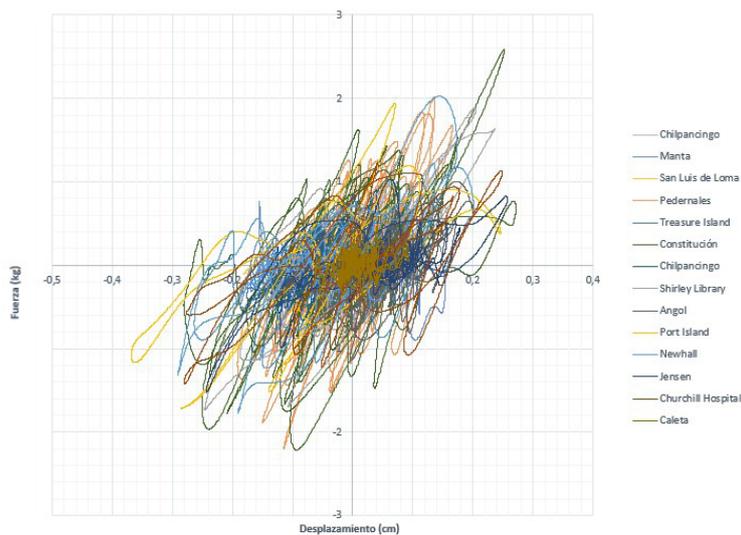


Figura 9. Curva de histéresis de los aisladores usados en el modelo 3

Las energías de la curva de histéresis de cada modelo se muestran a continuación:

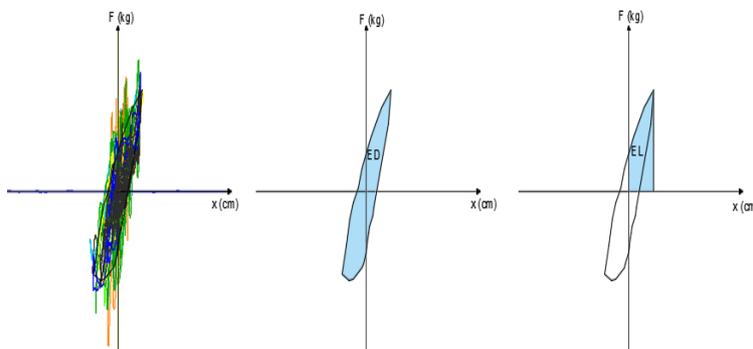


Figura 10. Energía disipada y elástica del diagrama de histéresis del modelo 1

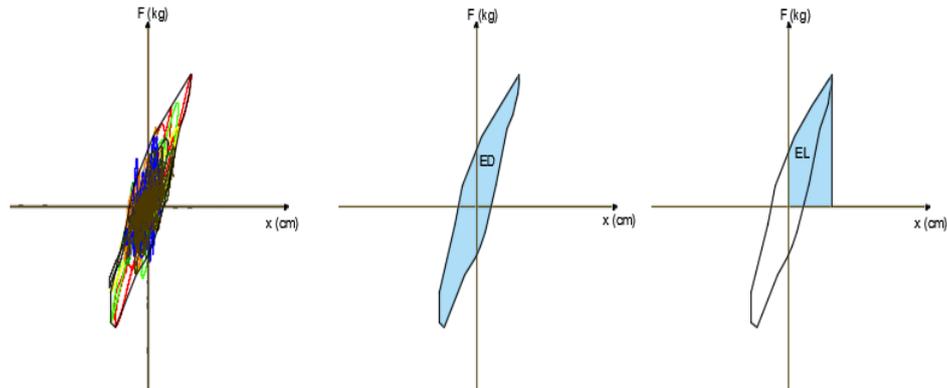


Figura 11. Energía disipada y elástica del diagrama de histéresis del modelo 2

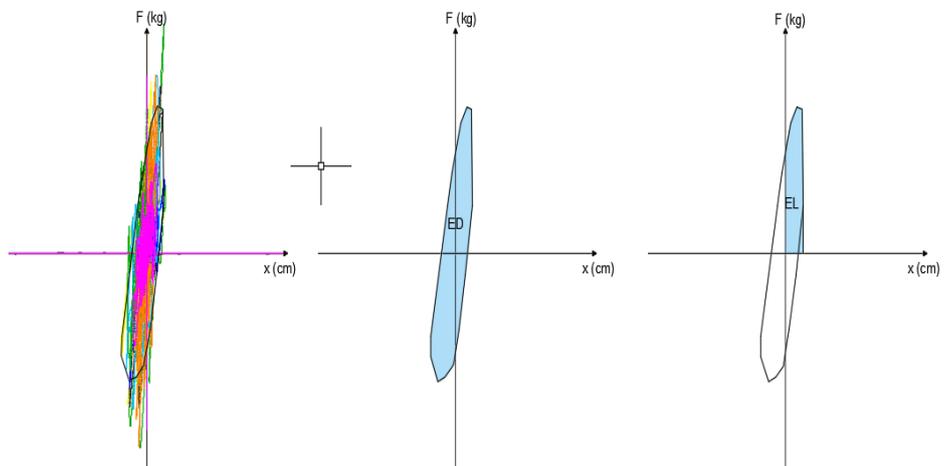


Figura 12. Energía disipada y elástica del diagrama de histéresis del modelo 3

El factor de amortiguamiento se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi \cdot E_L} \times 100\%$$

Donde:

ED: Energía Disipada

EL: Energía Elástica

El factor de amortiguamiento se calcula mediante la siguiente expresión:

$$k_{efe} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Desplazamiento}}$$

A partir de la curva de histéresis se determinó los datos que nos permitieron calcular el factor de amortiguamiento, así como la rigidez efectiva, tanto con el programa Seismosignal y cuyos resultados se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 3.

Resultados del factor de amortiguamiento

MODELO	ENERGÍA DISIPADA	ENERGÍA ELÁSTICA	ξ %
1	0,701	0,409	13,650
2	0,920	0,677	10,823
3	1,005	0,371	21,549

Tabla 4.

Resultados de la rigidez efectiva

M	SISMO	ESTACIÓN	Fuerza (kg)	Desplazamiento (cm)	K Efectivo (kg/cm)
1	Northridge 1994	Jensen Filter Plant Generator Building	1,166	0,454	2,569
	Kobe, Japón 1995	Port Island (0 m)	1,227	0,442	2,775
2	Loma Prieta 1989	Los Gatos - Lexington Dam	1,279	0,545	2,346
	Kobe, Japón 1995	Takatori	1,441	0,630	2,287
3	Maule 2010	Constitución	0,614	0,271	2,264
	Kobe, Japón 1995	Port Island (0 m)	1,106	0,369	2,996

Conclusiones

Con base en la experimentación realizada en los tres modelos se pudo demostrar la teoría de aislación sísmica, la cual manifiesta que se disminuirán considerablemente las demandas de aceleración si se incorpora un sistema de aislación.

Por medio de los análisis de resultados de los acelerogramas generados de los experimentaciones en la máquina de simulación agitadora, se logró obtener la curva de histéresis para cada modelo en el Sentido X, con ello, se obtuvieron los resultados de rigidez efectiva del modelo 1 de 2,672 kg/cm, del modelo 2 de 2,317 kg/cm y del modelo 3 de 2,630 kg/cm.

De igual manera, por medio de la curva de histéresis de todos los registros sísmicos se pudo establecer la energía disipada para la respuesta cíclica del sistema de aislación, así como también de la energía elástica las mismas que permiten obtener el factor de amortiguamiento, cuyos resultados fueron para el modelo 1 de 13,650%, para el modelo 2 de 10,823% y para el modelo 3 de 21,549%; logrando con ello determinar los parámetros de la curva de histéresis.

En esta investigación se utilizó el poliuretano, ya que es un material cuyo comportamiento se asemeja al de un aislador elastomérico, con el cual se logró un comportamiento lo bastante flexible para absorber la energía de los diferentes eventos sísmicos simulados, así como también lo suficientemente rígido para soportar el peso de cada modelo experimental.

Dentro de los resultados entre los distintos modelos experimentos también se realiza la comparación del porcentaje de aproximación de las aceleraciones de los modelos sin y con aislación, se observa que todos superan el 70%, sin embargo, el que presentó mejores resultados fue el del modelo 1 sin aislación con un 80,714% de aproximación entre los valores experimentales y teóricos. De igual forma, se observa que el modelo 2 con aislación obtuvo un porcentaje menor de aproximación con 76,060%, siendo de este modo el que menos que se asemeja entre los resultados.

Genatios y Lafuente, en su estudio realizado sobre la introducción del uso de aisladores y disipadores en estructuras, mencionan que “los aisladores sísmicos no solo reducen los desplazamientos horizontales sino también los concentra al igual que las deformaciones que generan sismos mayores en la zona de interfaz de la fundación y la estructura, que corresponde al aislador. Esto permite también hacer reparaciones de manera más sencilla y económica, ya que los eventuales daños se concentran en esas zonas”, con lo cual ratificamos a través de nuestra investigación experimental que a través de la presencia de aisladores sísmicos conseguimos una reducción considerable de las demandas de aceleración y por ende de sus desplazamientos horizontales.

El período fundamental de cada estructura fue determinado mediante la transformada de Fourier, para lo cual se usó una rutina de MATLAB, que fue elaborada por Hipocuro, A. y Cepeda, A. (2019), y arrojó los siguientes resultados

Tabla 5.

Frecuencia y período fundamental de cada modelo experimental sin y con aislación sísmica

MODELO	SIN AISLACIÓN			CON AISLACIÓN		
	f (Hz)	T (s)	ω (rad/s)	f (Hz)	T (s)	ω (rad/s)
1	13,960	0,072	87,716	2,913	0,343	18,304
2	11,255	0,089	70,714	4,293	0,233	26,971
3	5,354	0,187	33,638	2,237	0,447	14,054

Al analizar los períodos fundamentales de cada modelo tenemos una diferencia promedio de reducción en su aceleración espectral de 66% y al realizar un dato comparativo de resultados de períodos fundamentales con la tesis de Guamán, M. (2017) referente a la comparación del comportamiento estructural del edificio de aulas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central del Ecuador, empleando el método tradicional (NEC-14) y el método de aislación sísmica. (Tesis de pregrado) en el cual se tiene una diferencia de 73% de su aceleración espectral, concluyendo que la presencia de aisladores sísmicos en los dos estudios reduce considerablemente el valor de la aceleración espectral y por ende se tiene un aumento de seguridad sismorresistente a la estructura.

Se recomienda realizar otras investigaciones utilizando otros materiales como madera, hormigón armado para elaborar maquetas estructurales y someterlas a esfuerzos con control de deformaciones y establecer períodos fundamentales y aceleraciones espectrales, obtener de igual forma los diagramas de Histéresis para elementos aisladores sísmicos.

Referencias:

- Aguiar, R. (2008). Análisis Sísmico de Edificios. Primera edición. Quito: Centro de Investigaciones Científicas (Escuela Politécnica del Ejército).
- Alavi & Krawinkler. (2000). Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design. World Conf. on Earthquake Engineering, (pág. 2665). Nueva Zelanda.
- Alves, M. & Oshiro, R. (2006). Scaling impacted structures when the prototype and the model are made of different material. San Paulo: Universidad de Sao Paulo.
- Auqui, M. (2010). Análisis de aisladores sísmicos elastoméricos construidos en el Ecuador. Sangolquí: Centro de Investigaciones Científicas Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Bermeo, H. (2016). Determinación de espectros de respuesta y espectros de diseño elásticos e inelásticos para la ciudad de Cuenca. Cuenca: Tesis de pregrado.
- Cámara de la Construcción de Chile. (2011). Antecedentes generales sistemas de protección sísmica. Informe Técnico No. 05, 1-4.
- Chopra, A.K. (2011). Dynamics of Structures. Theory and applications to Earthquake Engineering. California: Prentice Hall.
- Genatios, C. & Lafuente, M. (2016). Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras. Caracas: Editor CAF.
- Guamán, M. (2017). Comparación del comportamiento estructural del edificio de aulas de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central del Ecuador, empleando el método tradicional (NEC-14) y el método de aislación sísmica. (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Korswagen, P.; Arias, J. & Huaranga, P. (2012). Análisis y Diseño de Estructuras con Aisladores Sísmicos en el Perú. Perú: Tesis de Pregrado – Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Machado Omonte, J. C., & Quistan Jurado, J. A. (2021). Evaluación sísmica de una vivienda doméstica con el uso de aisladores sísmicos basados en la norma E030 en un distrito de Lima, 2019: una revisión de la literatura científica.
- Ramos Choquehuanca, A. D. (2018). Análisis y diseño de una clínica haciendo uso de Aisladores Sísmicos en su Base.
- Torres, L. (2010). Efectos de sitio observados en estaciones acelerográficas de la ciudad de Puebla. México: Tesis de Pregrado - Universidad Autónoma de México.
- Vega Castillo, D. A. M. (2020). Aisladores sísmicos en el desempeño sismorresistente para estructuras de concreto armado en zonas urbanas: una revisión de la literatura científica.
- Zellat, K. (2015). Influencia del sistema de aislación sísmica en la respuesta de los puentes. Ingeniería de Construcción, 210-214.