

Desarrollo de Sistema de Aislamiento Sísmico de Bajo Costo para Viviendas de Albañilería de 01 a 02 niveles

Development of a Low-Cost Seismic Isolation System for Masonry Housing of 01 to 02 levels

Desenvolvimento de Sistema de Isolamento Sísmico de Baixo Custo para Casas de Alvenaria de 01 a 02 pavimentos

Yalmar Carrera ¹, Enrique Simbort ²

Recibido: 28/01/2023

Aceptado: 22/03/2023

Resumen. - El elevado costo de los dispositivos antisísmicos en la actualidad, hace prácticamente imposible su uso en edificaciones de viviendas de comunidades de escasos recursos económicos, dejándolas expuestas a los acontecimientos sísmicos. Por dicho motivo, se tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de aislamiento sísmico de bajo costo, elaborado con materiales económicos y accesibles. En la etapa inicial se desarrolló un modelo matemático, analizando su estabilidad mediante retratos de fase y el principio mínimo de energía potencial. A continuación, se analizó la influencia de parámetros geométricos en la respuesta dinámica del sistema. Con la implementación numérica del modelo, se analizó la respuesta estructural del sistema cuando es sometido a sismos con contenidos de frecuencias distintos, obteniendo como resultado una reducción de aceleraciones totales que varían entre un rango de 4.5 veces. El sistema se validó a través de la adquisición de las propiedades dinámicas con sismógrafos, de un modelo experimental expuesto a microtrepidaciones; y su comparación con los resultados obtenidos del modelo matemático. El sistema de aislamiento propuesto no solo reduce las aceleraciones bajo los sismos propuestos, sino que también posee la característica principal de un sistema de aislamiento sísmico: Elongación de periodos.

Palabras clave: Protección Sísmica; Sistema de Aislamiento de Bajo Costo; Superficie cóncava; Aislador esférico.

Summary. - *The high cost of current anti-seismic devices makes it practically impossible to use them in housing buildings in low-income communities, leaving them exposed to seismic events. For this reason, the objective is to develop a low-cost seismic isolation system, made with inexpensive and accessible materials. In the initial stage, a mathematical model was developed, using its stability by means of phase portraits and the minimum potential energy principle. Then, the influence of geometrical parameters on the dynamic response of the system was analyzed. With the*

¹ Ingeniero Civil, yalmar.carrera@ucsp.edu.pe, Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2543-166X>

² PhD Ingeniería Estructural, egsimbort@ucsp.edu.pe, Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5187-3309>

numerical implementation of the model, the structural response of the system was analyzed when subjected to earthquakes with different frequency contents, obtaining as a result a reduction of total accelerations that vary between a range of 4.5 times. The system was validated through the acquisition of the dynamic properties with seismographs, of an experimental model exposed to microtremors; and its comparison with the results obtained from the mathematical model. The proposed isolation system not only reduces the accelerations under the proposed earthquakes but also possesses the main characteristic of a seismic isolation system: period elongation.

Keywords: *Seismic Protection; Low-Cost Isolation System; Concave Surface; Spherical Isolator.*

Resumo. - *O alto custo dos dispositivos antissísmicos hoje praticamente impossibilita seu uso em prédios residenciais de comunidades de baixa renda, deixando-os expostos a eventos sísmicos. Por isso, o objetivo é desenvolver um sistema de isolamento sísmico de baixo custo, feito com materiais baratos e acessíveis. Na etapa inicial, foi desenvolvido um modelo matemático, analisando sua estabilidade através de retratos de fase e o princípio mínimo de energia potencial. Em seguida, foi analisada a influência dos parâmetros geométricos na resposta dinâmica do sistema. Com a implementação numérica do modelo, foi analisada a resposta estrutural do sistema quando submetido a sismos com diferentes conteúdos de frequência, obtendo como resultado uma redução das acelerações totais que variam entre um intervalo de 4,5 vezes. O sistema foi validado através da aquisição das propriedades dinâmicas com sismógrafos, de um modelo experimental exposto a microtrepidações; e sua comparação com os resultados obtidos a partir do modelo matemático. O sistema de isolamento proposto não apenas reduz as acelerações sob os terremotos propostos, mas também possui a principal característica de um sistema de isolamento sísmico: o alongamento do período.*

Palavras-chave: *Proteção Sísmica; Sistema de Isolamento de Baixo Custo; superfície côncava; isolador de bola.*

1. Introducción.- El territorio peruano se encuentra en una amenaza constante dado que, geográficamente, se posiciona sobre el cinturón de fuego del pacífico [23] [2]. En esta zona, ocurrieron los eventos sísmicos más devastadores de la tierra, entre ellos, los terremotos de Lima 1960, Lima 1974, Arequipa (Camaná) 2001, Ica (Pisco) 2007, Arequipa (Atico) 2018. Asimismo, el cinturón de fuego del pacífico, abarca tres cuartas partes de todos los volcanes del mundo [1] [2]. En consecuencia, existe el peligro constante ante eventos sísmicos de gran intensidad que puedan ocurrir en la región del Perú. El correcto comportamiento de una estructura implica el equilibrio entre la seguridad y comodidad, para ello, durante todo el proceso del diseño y construcción, en primera instancia, se busca controlar los esfuerzos internos, externos y sus consecuentes desplazamientos. Las fuerzas y esfuerzos que se imponen a la estructura son sustentados por los elementos portantes (elementos estructurales), lo cual implica, que los esfuerzos producidos por las cargas sísmicas a la estructura tienen un gran rango de variación.

Es común que los elementos estructurales logren disipar la energía a través del daño, comprometiendo la integridad del edificio. Para atender esta necesidad a lo largo del tiempo se han desarrollado distintos sistemas de disipación de energía, siendo los más eficientes y conservativos los métodos de aislamiento y control de vibraciones pasivas [26] [21]. El uso de este tipo de sistemas y dispositivos en edificaciones está aumentando en el mundo [6], aunque la medida de su uso está fuertemente influenciada por la experiencia sísmica [9] y las características de las normas de diseño locales. Teniendo como principal premisa la preservación de la vida durante y después de un sismo, los dispositivos disipadores de energía han sido principalmente utilizados en estructuras de carácter esencial, tales como hospitales, colegios, y otros espacios que puedan ser utilizados como albergues y centros de atención para la población, dejando sin atención un gran sector de las edificaciones tales como las estructuras menores, las cuales presentan un problema de irregularidades y/o fallas estructurales importantes, siendo incapaces de soportar las acciones sísmicas a las que puedan ser sometidas. Dicha carencia no se debe principalmente a la falta de compatibilidad, sino más bien a que los sistemas de aislamiento sísmico no son accesibles económicamente a la sociedad. Algunos códigos de diseño sismorresistente han permitido aprovechar económicamente los sobrecostos que implica aislar una estructura; pero aun con ellos, existen grandes brechas que no se han podido suplir, en su gran mayoría asociadas al alto impacto económico en un presupuesto de una estructura menor.

Para solucionar este problema, se propuso, en otras regiones bajo amenaza sísmica, distintos sistemas de aislamiento de bajo costo [16]; por ejemplo, con enfoque en la fricción entre diversos materiales como el caucho reciclado [8] [20] [22] [24] [25], arena [27], PVC [27], membranas de polietileno [28], cojinetes de deslizamiento [11] y con enfoque cinemático, usando concreto armado [3-5] [15]. Logrando obtener una reducción de aceleraciones de hasta el 75%, logrando aumentar la resiliencia de las edificaciones.

Para suplir esta brecha de edificaciones desatendidas en nuestra región [7] [10] [13], se propone el desarrollo de modelos de aisladores sísmicos elaborados con materiales accesibles como el concreto armado; y su validación a través de un prototipo. Esto contribuirá al fortalecimiento de la resiliencia sísmica en el Perú, con el propósito fundamental de que las comunidades tengan la capacidad de recuperarse rápidamente después de un sismo de gran magnitud e intensidad, a través de la mitigación y preparación pre-desastres.

2. Sistema de aislamiento de tipo Esfera: Superficie cóncava. - El sistema de aislamiento sísmico propuesto de tipo superficie cóncava - aislador esférico consta de esferas distribuidas en toda el área de la estructura, que se apoyan sobre una cimentación con superficies cóncavas. Dichas

esferas soportan el peso de la edificación que se apoya sobre ellas y reduce la aceleración del suelo en la superestructura debido a las características cinemáticas del sistema, las cuales se basan en la traslación y rodamiento. El comportamiento cinemático [17–19] obtenido permite elongar el periodo de la estructura, en consecuencia, el sistema garantiza el incremento de la resiliencia de edificaciones en zonas de alto riesgo sísmico [26].



Figura I.- Aplicación del sistema de aislamiento propuesto de tipo: Esfera – Superficie Cóncava, (a) Perspectiva Isométrica. (b) Estructura del sistema propuesto.

La propuesta de sistema de aislamiento sísmico busca reducir la vulnerabilidad estructural para tener un menor riesgo bajo diversos escenarios sísmicos: Sismo de diseño (SD) y sismo máximo considerado (SMC). Con respecto a las condiciones geotécnico-sísmicas, el sistema de aislamiento se implementará en condiciones favorables de suelo debido al alto costo de estudios detallados, diseño y construcción que implicaría trabajar en suelos blandos.

3. Modelo Matemático. -

3.1. Derivación de las ecuaciones de movimiento. - Para obtener la ecuación de movimiento se aplicó el método de Lagrange [12], para ello inicialmente se ubicó el punto de interés (punto de contacto entre la superficie horizontal superior y la esfera).

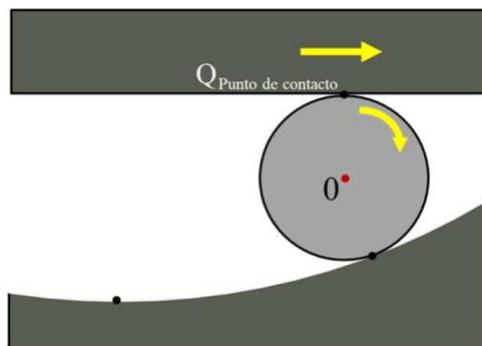


Figura II.- Punto de interés para el sistema de aislamiento propuesto, denotado por Q (Punto de Contacto).

(a) Energía Cinética

La energía cinética depende de encontrar la velocidad del punto de contacto de la plataforma, se aplicó el concepto de centro instantáneo de rotación [14].

$$v = w \cdot l \tag{1}$$

Donde:

w: velocidad angular.

l: longitud del centro instantáneo de rotación al punto de interés.

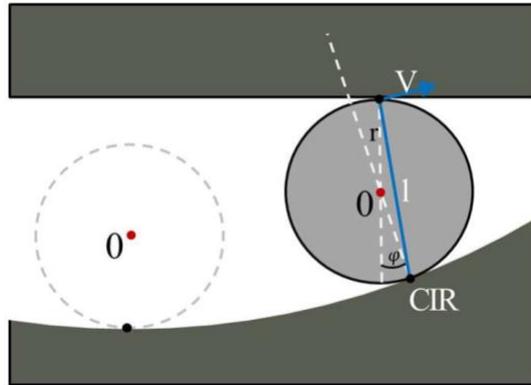


Figura III.- Esquema geométrico para el cálculo de la velocidad del punto de contacto.

Por relaciones geométricas se obtuvo la longitud del centro instantáneo rotación al punto de interés:

$$l = 2 \cdot r \cdot \cos(\varphi/2) \tag{2}$$

De igual manera para el cálculo de la velocidad angular:

$$w = \frac{R - r}{r} \cdot \varphi' \tag{3}$$

Reemplazando (3) y (2) en (1); tenemos la velocidad:

$$v = 2 * (R - r) \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \varphi' \tag{4}$$

Donde:

φ: Coordenada generalizada.

r: Radio de la esfera.

R: Radio de la superficie cóncava.

La energía cinética se expresa como:

$$T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Al reemplazar la expresión (4), tenemos:

$$T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (2 \cdot (R - r) \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \varphi')^2 \quad (5)$$

(b) Energía Potencial

La energía potencial depende del desplazamiento vertical del sistema.

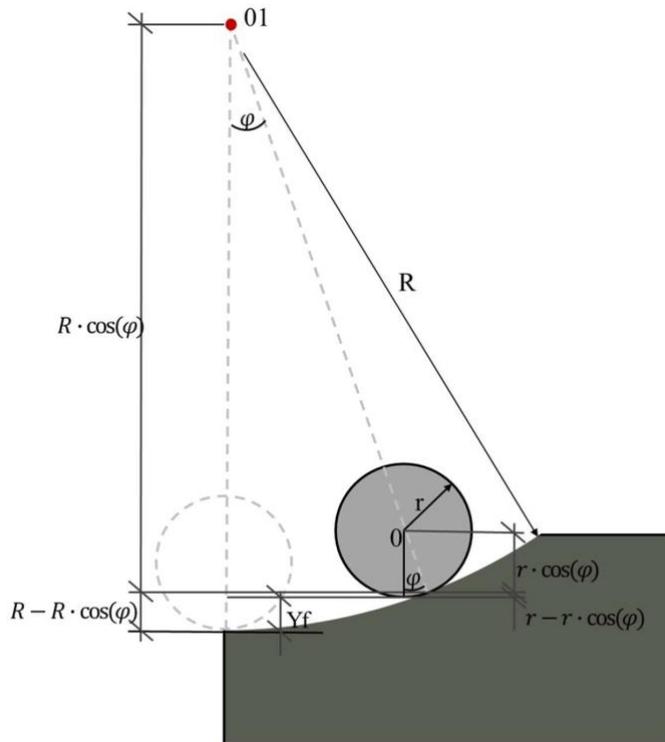


Figura IV.- Esquema geométrico para el cálculo del desplazamiento vertical.

Por relaciones geométricas, se tiene:

$$y_f = (R - R \cdot \cos(\varphi)) - (r - r \cdot \cos(\varphi))$$

Al abreviar la expresión:

$$y_f = (R - r) \cdot (1 - \cos(\varphi)) \quad (6)$$

Para la energía potencial, se reemplazó (6) en:

$$\Pi = m \cdot g \cdot h$$

$$\Pi = m \cdot g \cdot (R - r) \cdot (1 - \cos(\varphi)) \quad (7)$$

(c) Aplicación de Lagrange

El principio de Lagrange [1]:

$$\frac{dL}{dq_j} - \frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}_j} = 0$$

La coordenada generalizada se realizó con φ :

$$\frac{dL}{d\varphi} - \frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{\varphi}} = 0$$

El lagrangiano (L) se expresa de la siguiente manera:

$$L = T - \Pi$$

Se utilizó las expresiones (5) y (7), las cuales se reemplazaron en el lagrangiano:

$$L = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(2 \cdot (R - r) \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \varphi' \right)^2 - m \cdot g \cdot (R - r) \cdot (1 - \cos(\varphi))$$

Al reemplazar (8) en el principio de Lagrange, se obtuvo las siguientes ecuaciones, ecuación de movimiento en oscilaciones libres sin amortiguamiento:

$$(2 + 2 \cdot \cos(\varphi)) \cdot \ddot{\varphi} + \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi) - \frac{g}{R - r} \cdot \sin(\varphi) = 0$$

La ecuación de movimiento al considerar el amortiguamiento:

$$(2 + 2 \cdot \cos(\varphi)) \cdot \ddot{\varphi} + \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi) - \frac{g}{R - r} \cdot \sin(\varphi) + \frac{(2 + 2 \cdot \cos(\varphi)) \cdot C_b \cdot \dot{\varphi}}{m} = 0$$

La ecuación de movimiento tomando en cuenta la excitación sísmica externa:

$$(2 + 2 \cdot \cos(\varphi)) \cdot \ddot{\varphi} + \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi) - \frac{g}{R - r} \cdot \sin(\varphi) + a_g \cdot \frac{(1 + \cos(\varphi))}{R - r} + \frac{(2 + 2 \cdot \cos(\varphi)) \cdot C_b \cdot \dot{\varphi}}{m} = 0$$

3.2 Evaluación de condiciones de equilibrio y estabilidad.-

La energía potencial del sistema propuesto se expresa de la siguiente forma:

$$\Pi = m \cdot g \cdot (R - r) \cdot (1 - \cos(\varphi))$$

Como primer paso para la evaluación del equilibrio, se determinó la primera derivada de la energía potencial, obteniendo:

$$\frac{d\Pi}{d\varphi} = 0$$

Al operar se obtuvo:

$$\begin{aligned} \frac{d\Pi}{d\varphi} &= m \cdot g \cdot (R - r) \cdot \sin(\varphi) \\ 0 &= m \cdot g \cdot (R - r) \cdot \sin(\varphi) \end{aligned}$$

El valor de φ :

$$\varphi = 0 \text{ rad}$$

El segundo paso, para evaluar la estabilidad y equilibrio del sistema, se reemplazó el valor de φ , en la segunda derivada:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\Pi}{d\varphi^2} &= m \cdot g \cdot (R - r) \cdot \cos(\varphi) \\ \frac{d^2\Pi}{d\varphi^2} &= m \cdot g \cdot (R - r) \end{aligned}$$

Se realizó un análisis de los siguientes términos de:

$$\text{masa}(m) > 0, \text{gravedad}(g) > 0 \text{ y } R > r.$$

Dicho análisis nos permitió afirmar que:

$$\frac{d^2\Pi}{d\varphi^2} > 0$$

Por lo que, el sistema se encuentra en equilibrio estable, para la posición: $\varphi = 0 \text{ rad}$.

3.3 Evaluación de condiciones de estabilidad dinámica usando los retratos de fase.-

El estudio de la estabilidad requirió del retrato fase [14], el cual se realizó a partir del gráfico de la velocidad angular ($\dot{\varphi}$) respecto a la rotación angular (φ).

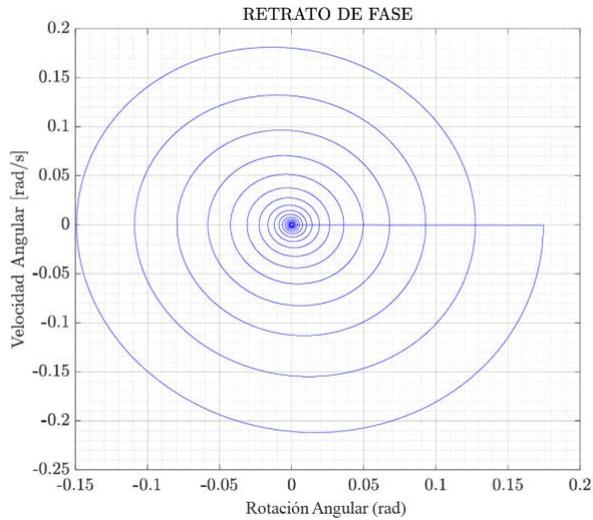


Figura V.- Retrato de Fase para Oscilaciones Libres.

La Figura V muestra el retrato de fase para los valores iniciales de generalizada de $(\varphi, \dot{\varphi}) = (10^\circ, 0 \text{ rad/s})$. Con los parámetros geométricos de $R=1.50\text{m}$ y $r=0.075\text{m}$. Se interpreta que el retrato de fase obtiene su posición final para $(0 \text{ rad}, 0 \text{ rad/s})$. Esto quiere decir que, el sistema alcanza posición inicial y estable a través del tiempo.

De manera similar se interpreta el retrato de fase para el caso en el que nuestro sistema de aislamiento es sometido a una excitación sísmica, para ello se utilizó el siguiente registro de aceleraciones sísmicas.

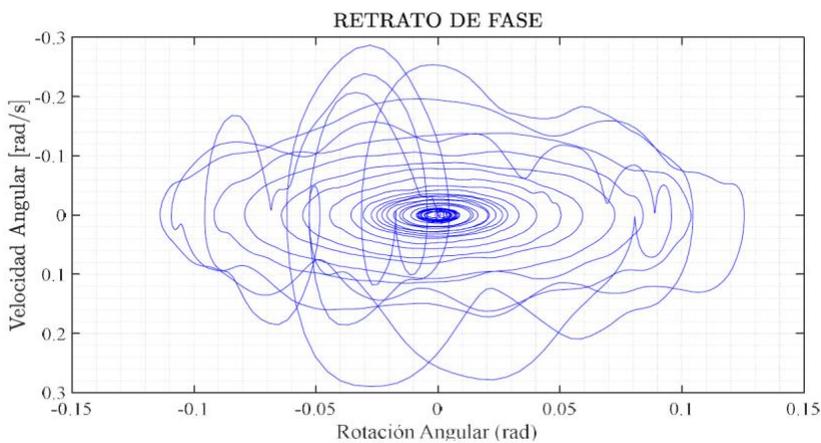


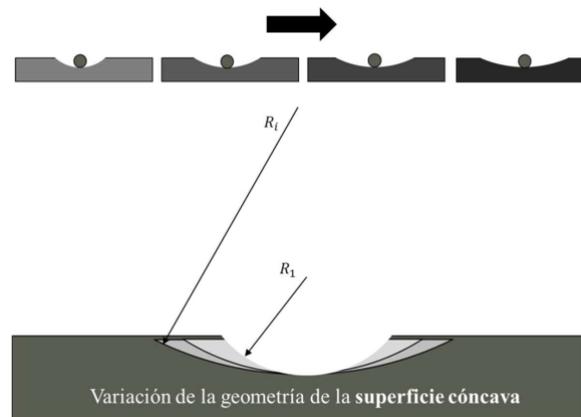
Figura VI.- Retrato de Fase para el Sismo de Kobe (Japón).

El resultado de considerar la fuerza sísmica (sismo de Kobe), con los parámetros geométricos $R=1.50\text{m}$ y $r=0.075\text{m}$. En la Figura VI, se puede apreciar la notable diferencia con el retrato de fase bajo oscilaciones libres, sin embargo, los resultados del sistema coinciden en la posición final, la cual es $(\varphi, \dot{\varphi}) = (0 \text{ rad}, 0 \text{ rad/s})$, dicho punto coincide con el punto de equilibrio del sistema, los diagramas fase obtenidos son controlados y estables ya que sus trayectorias tienen características de ser suaves y redondeadas.

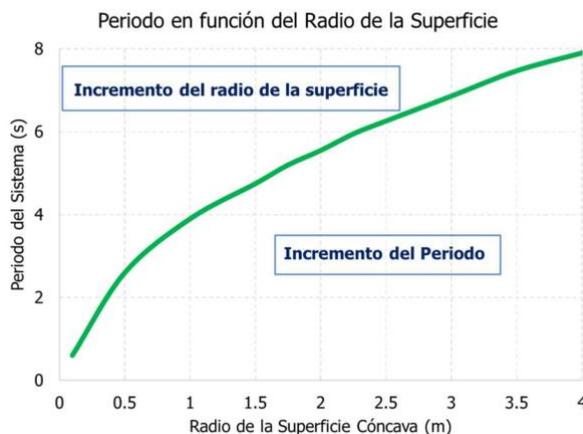
3.4 Influencia de parámetros geométricos. - La geometría del sistema aislamiento está caracterizado por el radio de la superficie cóncava (R) y el radio de la esfera (r). Ambos parámetros fueron evaluados para analizar su influencia en la respuesta dinámica del sistema de aislamiento.

(a) Influencia de la geometría de la superficie cóncava

La energía cinética depende de encontrar la velocidad del punto de contacto de la plataforma, se aplicó el concepto de centro instantáneo de rotación [14].



(a)



(b)

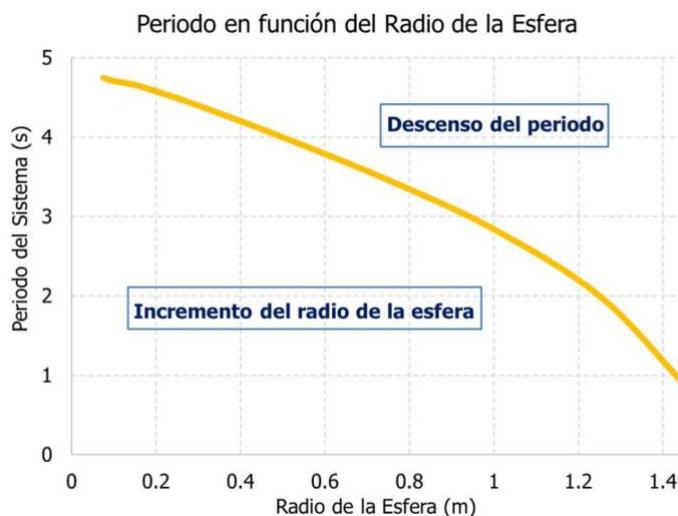
Figura VII.- Influencia de la superficie cóncava en la respuesta dinámica del sistema. (a) Cambios en la geometría de la superficie. (b) Cambio del periodo en función del radio de la superficie.

El incremento del radio de la superficie cóncava ocasionó que el periodo de vibración del sistema de aislamiento propuesto presentará un incremento, es decir, el periodo está en relación directa con radio de la superficie.

(b) Influencia de la geometría del aislador esférico



(a)



(b)

Figura VIII.- Influencia del aislador esférico en la respuesta dinámica del sistema. (a) Cambios en la geometría del aislador esférico. (b) Cambio del periodo en función del radio de la superficie.

El incremento del radio de la esfera ocasionó que el periodo de vibración del sistema de aislamiento propuesto presentará un descenso, es decir, el periodo está en relación indirecta con radio de la superficie.

3.5 Respuesta dinámica en términos de aceleración absoluta. -

- Aceleración absoluta:

Por relaciones geométricas se obtiene lo siguientes desplazamientos:

$$x_f = (R - r) \cdot \text{sen}(\varphi)$$

$$y_f = (R - r) \cdot (1 - \text{cos}(\varphi))$$

Las velocidades tomando en cuenta la influencia de la rotación de la esfera son:

$$v_x = 2 \cdot (R - r) \cdot \left(\text{cos} \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right)^2 \cdot \dot{\varphi}$$

$$v_y = 2 \cdot (R - r) \cdot \text{cos} \left(\frac{\varphi}{2} \right) \cdot \text{sen} \left(\frac{\varphi}{2} \right) \cdot \dot{\varphi}$$

Las aceleraciones por derivación respecto al tiempo serán:

$$a_x = (R - r) \cdot \left((1 + \text{cos}(\varphi)) \cdot \ddot{\varphi} - \dot{\varphi}^2 \cdot \text{sen}(\varphi) \right)$$

$$a_y = (R - r) \cdot \left((\text{cos}(\varphi)) \cdot \ddot{\varphi} - \dot{\varphi}^2 \cdot \text{sen}(\varphi) \right)$$

a_x , es la aceleración relativa horizontal. Para evaluar la respuesta del sistema ante el sismo requerimos de la aceleración absoluta es:

$$a_{abs} = a_x + a_g$$

Donde: a_g , es el registro sísmico de aceleraciones.

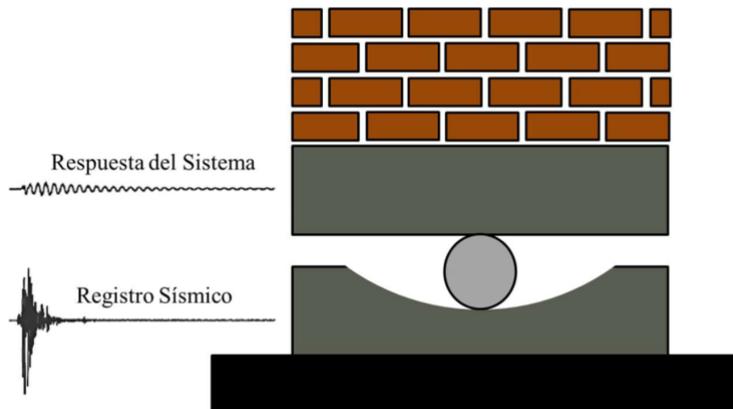
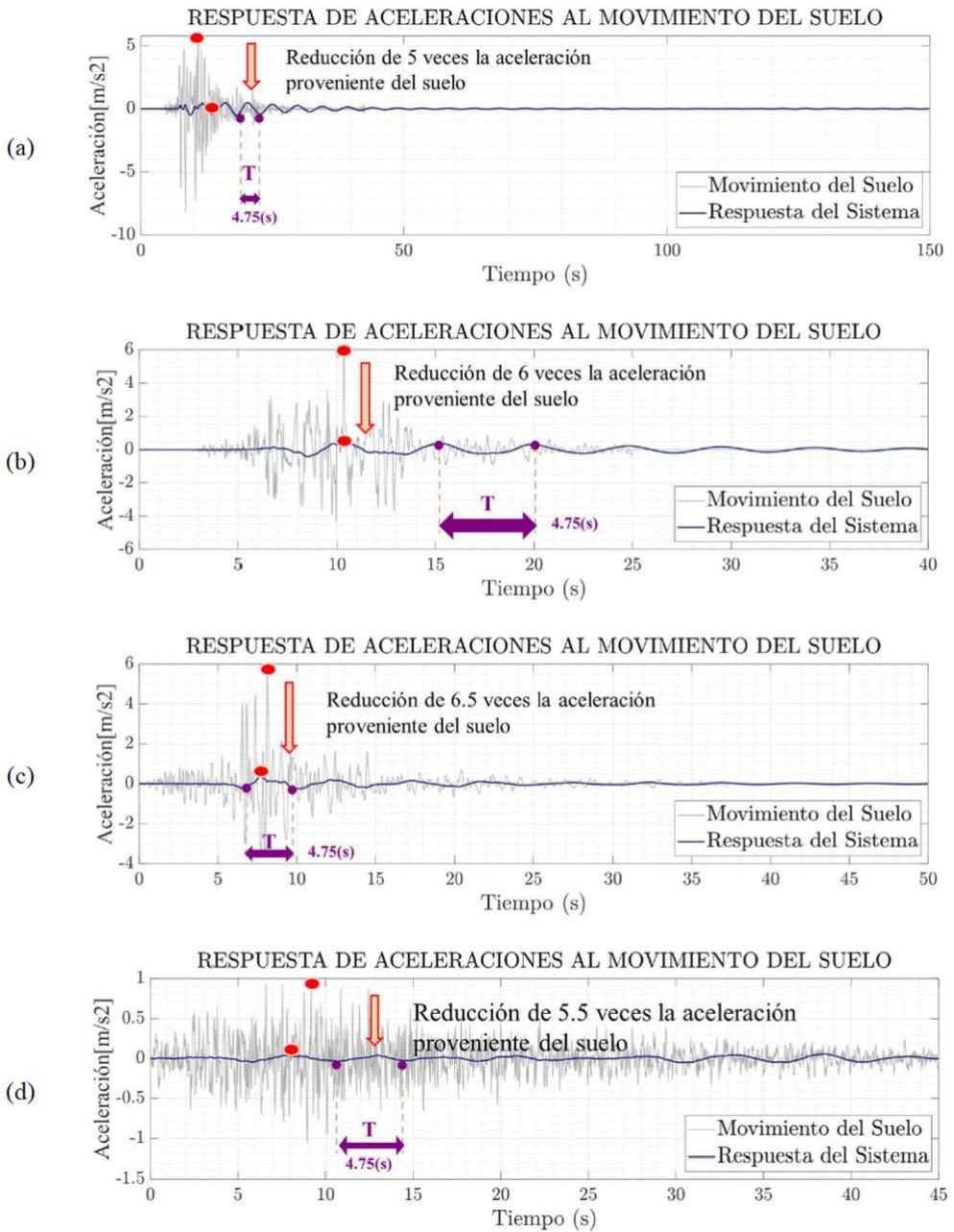


Figura IX.- Respuesta del sistema ante registro sismográfico.



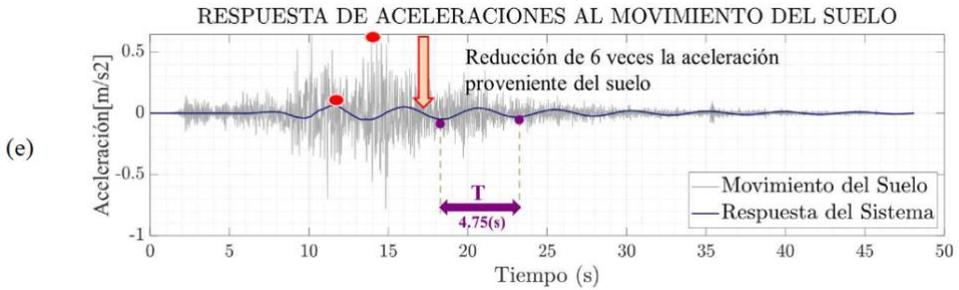


Figura X.- Historia de aceleraciones absolutas del sistema de aislamiento sometido al sismo en: (a) Kobe 1995, (b) Loma Prieta 1989, (c) Northridge 1994, (d) Ancash 1970 y (e) Landers 1992.

4. Validación del modelo matemático. -

4.1 Descripción y construcción del espécimen. - El espécimen fue construido para una escala 1:15 con la capacidad de deslizamiento, es decir la superficie cóncava tiene un radio de 150 mm y el radio de la esfera es de 7.5 mm, así mismo, se colocó un sistema de retención limitando el desplazamiento durante las pruebas.

La siguiente figura muestra las secciones, planos de las piezas, así como la representación tridimensional del espécimen construido.

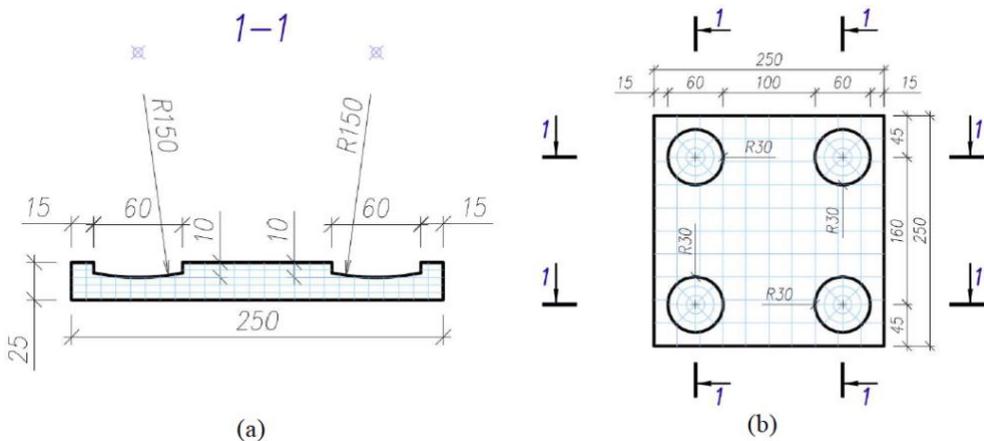


Figura XI.- (a) Vista de sección y (b) Vista en planta del espécimen de la superficie cóncava, unidades en milímetros.

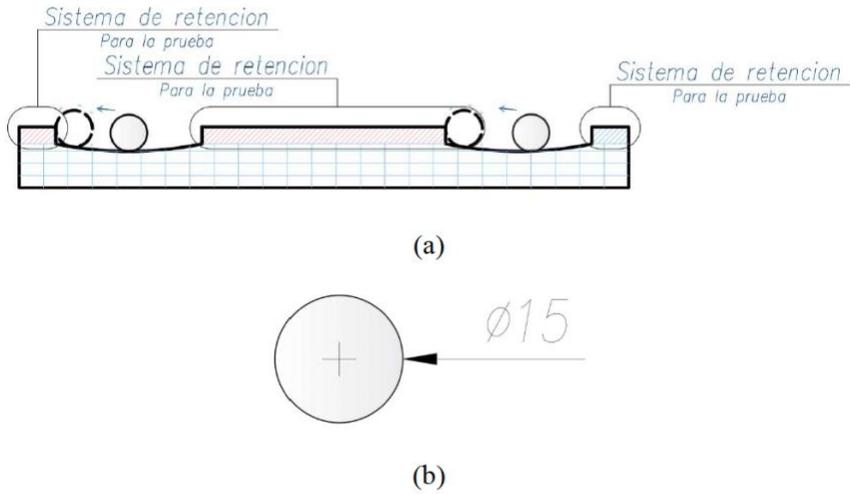
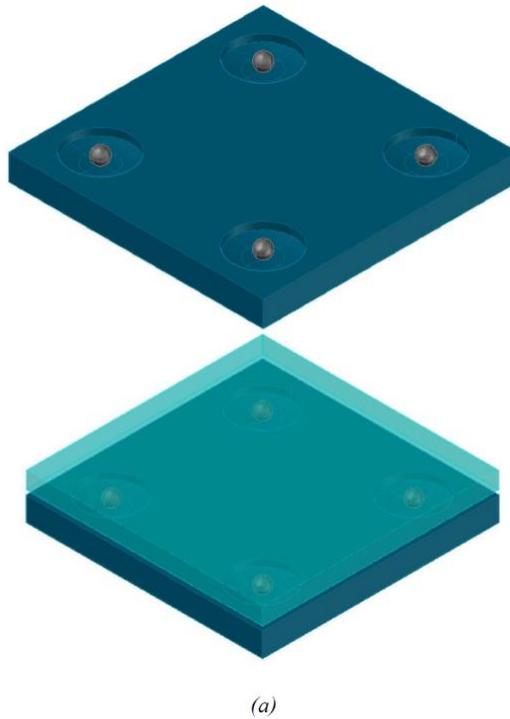


Figura XII.- (a) Sistema de retención para las pruebas y (b) Geometría de la esfera, unidades en milímetros.





(b)

Figura XIII.- (a) Vista tridimensional del espécimen con la placa superior y (b) Sección del espécimen tridimensional.

La placa superior está hecha de ácido poliláctico de manera sólida la cual se logró mediante una impresión 3D, así mismo, se garantizó la uniformidad tanto en medidas como en la ortogonalidad del elemento. La placa inferior fue realizada con MDF de espesor de 28mm, también sólido, finalmente las esferas rodantes fueron de acero para asegurar una geometría precisa y rígida. La geometría de las piezas fue la siguiente:

Elemento	Dimensión
Esfera rodante Material: Acero	Diámetro de 16.0mm
Superficie cóncava Material: MDF	Radio de 14.5cm

Tabla I.- Geometría del espécimen utilizado en la práctica experimental.



Figura XIV.- Toma de medidas a la geometría del sistema de aislamiento (superficie en MDF y esferas en acero).

4.2 Equipo y esquema de pruebas. - El sistema se probó bajo oscilaciones libres con condiciones iniciales de rotación y velocidad. En la Figura XV, se muestran los esquemas del equipo y el sistema propuesto. El sismógrafo, es capaz de darnos la respuesta dinámica del prototipo experimental, para el objeto de estudio: El periodo.

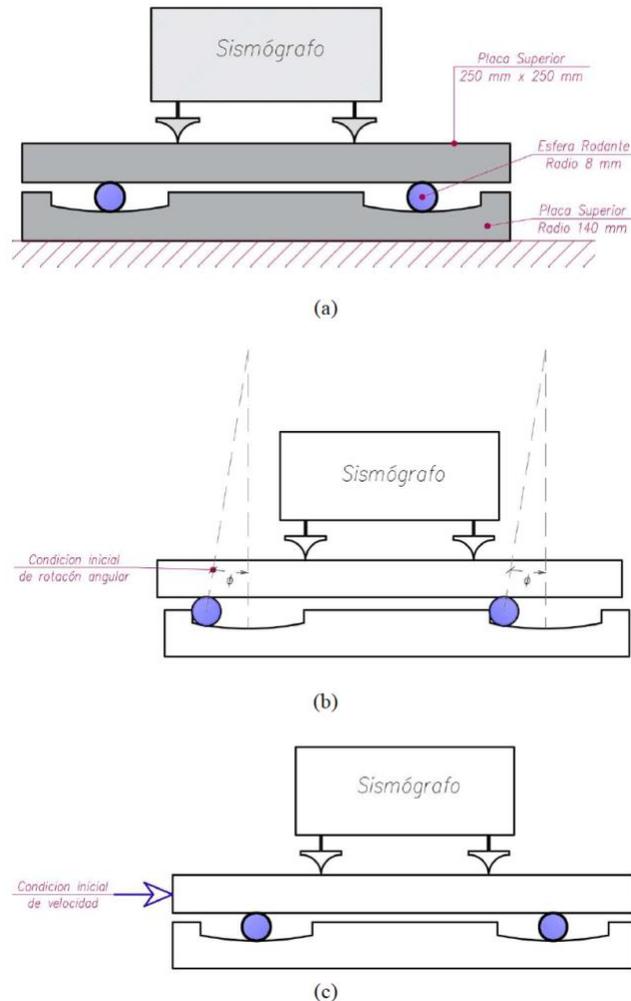


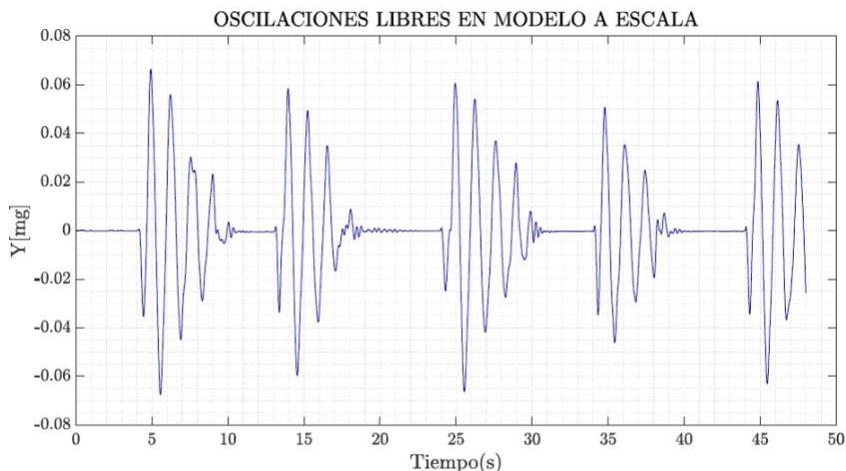
Figura XV. (a) -Esquema de toma de pruebas del equipo y el sistema, (b) Esquema para resultados a partir de posición inicial y (c) Esquema para resultados a partir de una velocidad inicial.

4.3 Resultados obtenidos en las pruebas experimentales. - Respecto a la parte experimental, se realizó dos mediciones, la primera, basada en la medición de microtrepidaciones y la limpieza de las mismas, se obtuvo el espectro de amplitudes, el cual, nos permite conocer el periodo (frecuencia) donde el sistema se excita (periodo predominante), y el segundo, un ensayo de medición de la respuesta del sistema bajo oscilaciones libres, considerando un desplazamiento como condición inicial.

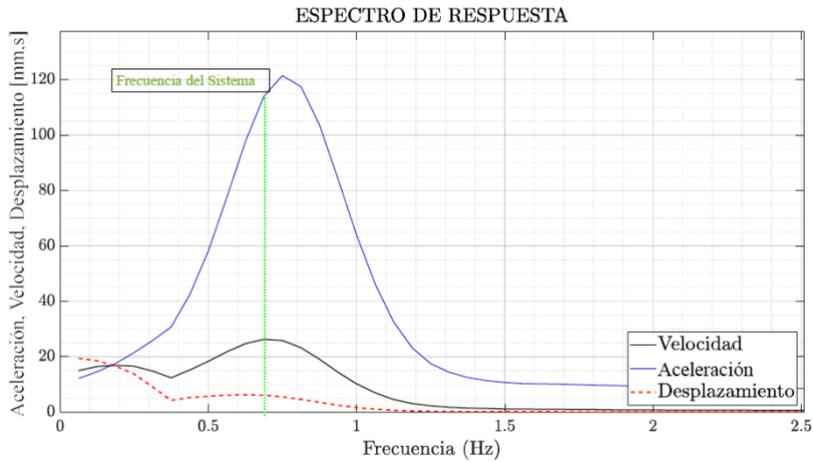


Figura XVI. Ensayo con sismógrafo en una dirección.

La primera medición, tuvo el objetivo de captar las microtrepidaciones, se realizó en un intervalo de 20 minutos con la finalidad de poder limpiar los datos de ruidos ambientales, la medición se realizó en una superficie plana y paralelamente se midió la misma cantidad de tiempo contraterreno (para la limpieza de datos). Respecto al registro de respuesta obtenido, aplicando la transformada de Fourier para estas señales periódicas (registro del sismógrafo), se obtuvo los espectros amplitud tanto para la aceleración, velocidad y desplazamiento, ver Figura XVII (b), el cual nos mostró la frecuencia del modo de vibración del sistema propuesto. La segunda medición fue realizada generando una condición inicial de rotación angular, para lograr ello se desplazó la plataforma superior hasta la máxima ubicación funcional de la esfera. Al ser liberado, el sistema osciló libremente hasta detenerse, el ejercicio se repitió 5 veces en el intervalo de 1 minuto, ver Figura XVII (a), dicha cinemática fue registrada por el sismógrafo, el cual nos permitió obtener las características dinámicas del sistema de aislamiento propuesto. Al graficar la data, se apreció las oscilaciones e identificó inicialmente algunos parámetros como la frecuencia predominante del sistema.



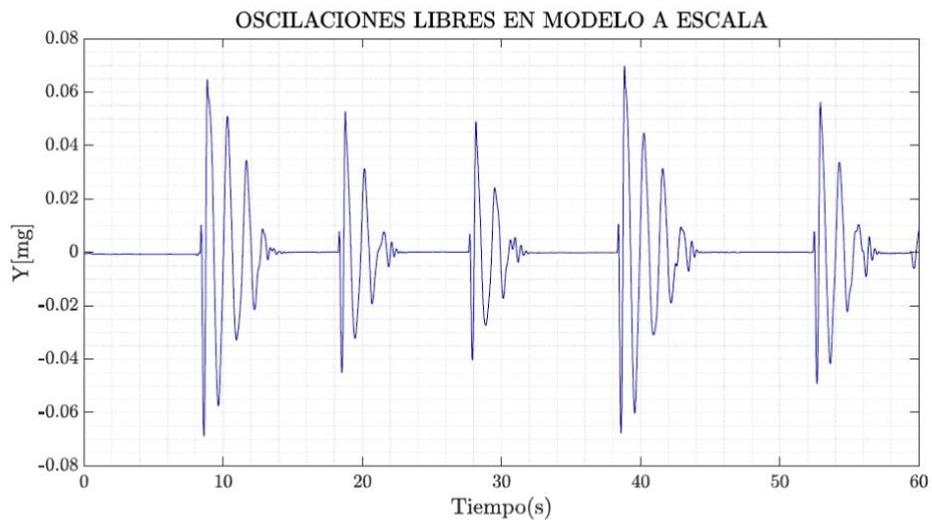
(a)



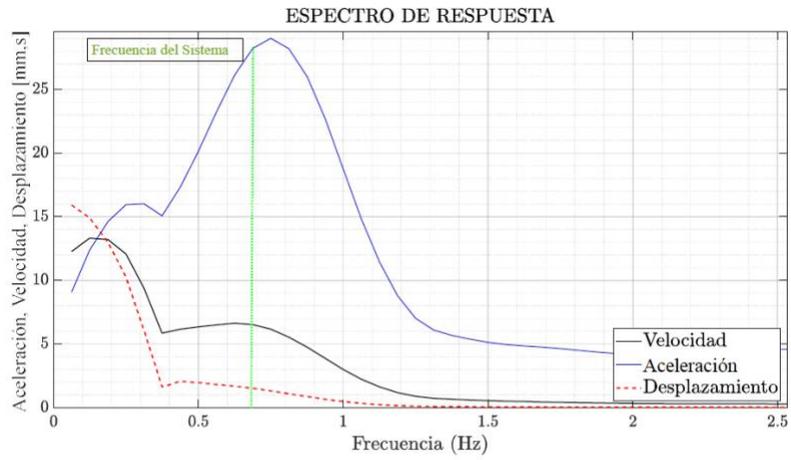
(b)

Figura XVII. (a) Registro del sismógrafo para el primer ensayo, (b) Espectro de amplitudes en desplazamiento, velocidad y aceleración.

Con la finalidad de corroborar la información obtenida, se repitió ambos ensayos, obteniendo resultados similares, ver Figura XVIII (a) y XVIII (b),



(a)



(b)

Figura XVIII. (a) Registro del sismógrafo para el segundo ensayo, (b) Espectro de amplitudes en desplazamiento, velocidad y aceleración.

4.4 Comparación del modelo matemático y ensayos realizados. - Las gráficas periódicas de las Figuras XVII(a) y XVIII(a), nos permitieron obtener el periodo predominante del sistema para los distintos ensayos realizados durante el tiempo del monitoreo, así como la razón de amortiguamiento crítico. Dichas gráficas tienen un comportamiento semejante, verificando que, tanto para el registro de respuesta como para el espectro de amplitudes, se tiene el mismo periodo y la misma razón de amortiguamiento. Las Figuras XVII(b) y XVIII(b), son espectros de amplitud, las cuales muestran la frecuencia del modo de vibración principal para el sistema ensayado: Rango cercano a los 0.70 Hz.

Finalmente se procedió a realizar la comparación entre los resultados obtenidos por el monitoreo estructural con sismógrafo y el modelo matemático implementado en Matlab para el espécimen del sistema de aislamiento propuesto, dicha comparación se expresa mediante la siguiente tabla.

Parámetros del espécimen	Sismógrafo		Matlab	Variación (%)
	Indicador	Periodo (s)	Periodo (s)	
R = 14.5cm, r=0.8cm y $\zeta = 5\%$	Espectro de amplitudes	1.408	1.48	5.1%
	Registro de respuesta	1.395		5.7%

Tabla II.- Comparativa de resultados obtenidos del modelo matemático y la práctica experimental.

Se realizó la comparación gráfica:

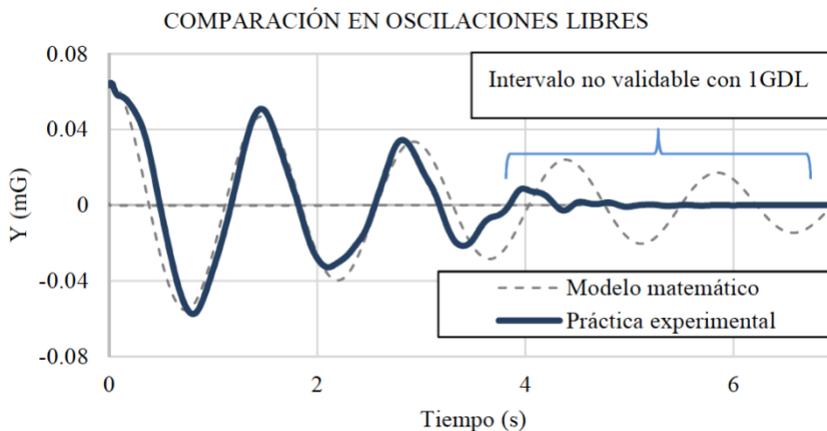


Figura XIX.- Comparativa en oscilaciones libres modelo matemático y la práctica experimental.

Considerando los resultados obtenidos del modelo matemático y la práctica experimental, se analizó la variación del periodo de vibración la cual llega a ser hasta el 5.70%. En la Figura XIX, tanto la respuesta del ensayo como la del modelo concuerdan en los tramos donde se comporta unidireccionalmente, sin embargo, para el tramo final difieren. La variación en el tramo final se debe a que la esfera al encontrarse cercano a su punto de estabilidad empieza a tener un comportamiento fuera del plano. Para validar este último tramo es necesario construir el modelo matemático del sistema desde una perspectiva tridimensional.

5. Conclusiones. –

- Se desarrolló un modelo matemático bajo un análisis dinámico para el sistema de aislamiento sísmico tipo esfera con la capacidad de trasladarse mediante la rotación en una superficie cóncava, donde el comportamiento del sistema de aislamiento es gobernado por ecuaciones diferenciales no lineales, las cuales fueron validadas de manera experimental.
- En base a los resultados obtenidos se tiene que el sistema es estable dinámicamente, esto se comprueba a través de los retratos de fase tanto para oscilaciones libres, así como para los sismos. Se apreció que a través del registro sismo, el sistema siempre tiende a acercarse a la posición angular de 0 rad y velocidad angular de 0 rad/s. Así mismo mediante el criterio de energía mínima potencial se demostró que el sistema se encuentra en equilibrio estable para la posición angular de 0 rad.
- Se concluye que la variación de la geometría en la superficie cóncava influye al periodo del sistema de manera directa. A mayor valor de R (Radio de la superficie cóncava), mayor periodo del sistema.
- Se concluye que la variación de la geometría en el radio del aislador influye al periodo del sistema de manera indirecta. A mayor valor de r (Radio de la esfera), menor periodo del sistema.
- Los resultados con un radio de esfera de 7.5cm, y una superficie de radio de 2.0m, utilizando como material el concreto, reduce considerablemente el costo de su fabricación que tomando en cuenta el material y la mano de obra es aproximadamente de S/500 por cada aislador propuesto, comparándolo con un sistema de aislamiento convencional el cual tiene un precio aproximado \$3000 (S/ 11550).
- Comparando el funcionamiento del aislador de bajo costo, con un Aislador convencional de Péndulo de fricción, se concluye que ambos sistemas funcionan a través de movimientos distintos, siendo que, el primero se desplaza a través de un movimiento de traslación y rotación, y el segundo solo se desliza.
- Se validó el sistema de aislamiento sísmico propuesto con un espécimen a escala 1:15, donde de manera cuantitativa se obtuvo una diferencia máxima de 5.7% entre el modelo matemático y el modelo experimental, siendo este valor aceptable para la validación del sistema.
- Se concluye que al someter el sistema diversos sismos como: Imperial Valley (USA), Ancash (Perú), Landers (USA), ChiChi (Taiwán), Kobe (Japón), Bucarest (Rumania), Loma Prieta (USA) y Northridge (USA), se observa una reducción de aceleración del 70%- 75%, comprobando la capacidad del sistema para reducir las aceleraciones a través del alargamiento del periodo, cumpliendo con la hipótesis de la investigación.

5. Agradecimientos. – Al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), por el apoyo financiero en la realización de este proyecto mediante el convenio 197-2020-FONDECYT.

7. Referencias

- [1] Bao, Y. y Becker, T, Three-dimensional double friction pendulum bearing model including uplift and impact behavior: Formulation and numerical example. *Engineering Structures*, 2019, vol. 199, p. 1-10.
- [2] Bethany, R. *Ring of Fire: An Encyclopedia of the Pacific Rim's Earthquakes, Tsunamis, and Volcanoes*, 2015, 1ra Edición. ABC-CLIO.LLC.
- [3] Cilsalar, H. y Constantinou, M. Behavior of a spherical deformable rolling seismic isolator for lightweight residential construction. *Bulletin of Earthquake Engineering* 17, 2019: p.4321–4345.
- [4] Cilsalar, H. y Constantinou, M. Earthquake Engineering to Extreme Events Development and Validation of a Seismic Isolation System for Lightweight Residential Construction, 2019, Technical Report Multidisciplinary and multi-hazard earthquake engineering research center – University at Buffalo.
- [5] Cilsalar, H. y Constantinou, M. Parametric study of seismic collapse performance of lightweight buildings with spherical deformable rolling isolation system. *Bulletin of Earthquake Engineering* 18, 2020: p.1475–1498.
- [6] de Luca, A. y Guidi, L. G. State of art in the worldwide evolution of base isolation design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 125, 2019: p. 1-13.
- [7] Enrique, A. y Becerra, E. Los desafíos para la construcción en el Perú, 2018, Camara Peruana de Comercio (CAPECO).
- [8] Foti, D. y Kelly, J. Experimental study of a reduced scale model seismically base isolated with Rubber-Layer Roller Beari (RLRB), *European Earthquake Engineering*, 1996
- [9] Harvey, S. y Kelly, C. A review of rolling-type seismic isolation: Historical development and future directions, *Engineering Structures*, 2016, vol.125, p. 521–531
- [10] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Perú: Características de las viviendas particulares y los hogares Acceso a servicios básicos, 2018, Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.
- [11] Jampole, E., et al. Full-scale dynamic testing of a sliding seismically isolated unibody house, *Earthquake Spectra*, 2016, vol. 32, p. 2245–2270.
- [12] Jerry M. y Sthephen T. *Classical Dynamics of Particles and Systems*, 2004, 5th Edition. Chris Hall.
- [13] Julio K. *Manual para la Reducción del Riesgo Sísmico de Viviendas en el Perú*, 2016, Ministerio de Vivienda y Construcción.
- [14] Karl Astrom y Richard M. *An introduction for scientists and engineers*, 2009, Version V.2.10b, Princeton University Press.
- [15] Katsamakas A. et al. Low-cost and sustainable seismic isolation with re-used tennis balls: Lateral cyclic tests. 3th European Conference on Earthquake Engineering & Seismology, 2022: p. 1- 10.
- [16] Katsamakas, A., et al Re-using tennis balls as low-cost seismic isolation devices: Experimental Investigation, 3th International Conference on Natural Hazards and Infrastructure, 2022.
- [17] Katsamakas, A., et al. Experimental investigation of spherical rubber seismic isolation bearings, 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2021.
- [18] Katsamakas, et al. Feasibility Study on Re-Using Tennis Balls as Seismic Isolation Bearings, *Frontiers in Built Environment*, 2021, vol. 7, p. 1-18.
- [19] Katsamakas, et al. Shake-table testing of low-cost seismic isolation bearings based on rolling rubber spheres, 3rd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure ,2022.
- [20] Kelly, J. y Takhirov, S. *Analytical and Experimental Study of Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators*, 2001, PEER Report.
- [21] Kelly, M. Seismic isolation systems for developing countries, *Earthquake Spectra* ,2002, vol. 18, p. 385–406.

- [22] Konstantinidis, D. y Kelly, J. Two Low-Cost Seismic Isolation Systems. 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012: p.1-9.
- [23] Masum, M. y Ali Akbar, M. The Pacific Ring of Fire is Working as a Home Country of Geothermal Resources in the World, 2nd International Geothermal Conference IOP Conference Series: Earth and Environmental Science vol. 249, 2019: p. 1 – 7.
- [24] Menga, N., Bottiglione, F. y Carbone, G. The nonlinear dynamic behavior of a Rubber-Layer Roller Bearing (RLRB) for vibration isolation, Journal of Sound and Vibration, 2019, vol. 463, p. 1-12.
- [25] Osgooei P., et al. Finite element analysis of unbonded square fiber-reinforced elastomeric isolators (FREIs) under lateral loading in different directions, Composite Structures, 2014, vol. 113, p. 164–173.
- [26] Roberto, V. Fundamental concepts of earthquake engineering, 2009, 1ra Edición. Taylor & Francis Group.LLC
- [27] Tsiavos, A. et al. Large-scale experimental investigation of a low-cost PVC ‘sand-wich’ (PVC-s) seismic isolation for developing countries. Earthquake Spectra EERI, 2020: p 1886–1911.
- [28] Xiao, H., Butterworth, J. W. y Larkin, T. Low-technology techniques for seismic isolation. New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2004: p. 1- 8.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

YC ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

ES ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.