

CALIBRACIÓN NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS DE UN SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO TIPO RODADURA

*F. Sanzana Arratia*¹, *N. Maureira Carsalade*², *M. Sanhueza Cartes*³

RESUMEN

En este documento se muestran los resultados experimentales de un sistema de aislamiento sísmico tipo rodadura, el cual fue diseñado y ensayado en la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Para esto se realizaron 3 diferentes tipos de ensayos, con el fin de obtener los valores de rigidez y amortiguamiento del sistema de aislamiento. Los ensayos realizados fueron: de carga de impacto; de vibración libre con desplazamiento inicial conocido y velocidad inicial nula; y de vibración forzada de la base o mesa vibradora. A partir de los ensayos realizados, se obtuvieron series de tiempo de los instrumentos de medición instalados, los cuales fueron procesados para obtener las respuestas de interés. Como resultados de interés se obtuvieron la aceleración de la mesa vibradora y del nivel de aislamiento, el desplazamiento de este último respecto de la mesa vibradora y la fuerza de corte basal. Los resultados de los ensayos de impacto y de vibración libre permitieron determinar la rigidez lateral del sistema de aislamiento y su capacidad de disipación de energía. Estos resultados fueron utilizados para calibrar los parámetros del modelo analítico preestablecido para el aislador utilizado. Finalmente, la validez del modelo analítico del aislador con parámetros calibrados fue verificada por comparación de resultados numéricos y experimentales del ensayo de vibración forzada.

Palabras clave: Aislador sísmico de tipo rodadura, ensayos en mesa vibradora, calibración de modelo.

ABSTRACT

This document shows the experimental results of a rolling-type seismic isolation system, which was designed and tested at the Universidad Católica de la Santísima Concepción. For this, 3 different types of tests were carried out, in order to obtain the stiffness and damping values of the insulation system. The tests carried out were: impact load; free vibration with known initial displacement and zero initial velocity; and forced vibration of the base or vibrating table. From the tests carried out, time series of the installed measuring instruments were obtained, which were processed to obtain the responses of interest. As results of interest, the acceleration of the shaking table and the isolation level, the displacement of the latter with respect to the shaking table and the basal shear force were obtained. The results of the impact and free vibration tests made it possible to determine the lateral rigidity of the insulation system and its energy dissipation capacity. These results were used to calibrate the parameters of the pre-established analytical model for the insulator used. Finally, the validity of the analytical model of the isolator with calibrated parameters was verified by comparing the numerical and experimental results of the forced vibration test.

Keywords: Rolling type seismic isolator, shaking table tests, model calibration.

¹Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, fsanzana@ing.ucsc.cl

²Profesor Guía, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, nmaureira@ucsc.cl

³Informante, Ingeniero Civil, Estudiante de Magister, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, msanhuezac@magister.ucsc.cl

1 INTRODUCCIÓN

Desde el inicio el planeta estuvo unido en un solo continente o supercontinente llamado Pangea, esto ocurrió y se formó debido al movimiento de las placas tectónicas. Al pasar las eras, este gran continente se comenzó a dividirse debido a los movimientos telúricos, erupciones volcánicas, terremotos y tsunamis.

Hoy en día, al haber pasado miles de años, se han definido los continentes que hoy conocemos mediante grandes movimientos telúricos, registrando los mayores sismos en el Anillo de fuego del Pacífico [1]. A lo largo de los años han ocurrido numerosos movimientos sísmicos a mayor o menor escala [2], siendo Chile un país bastante afectado por todas estas liberaciones de energía a nivel mundial. Debido a esto en el país se han registrados grandes sismos, siendo el del año 2010 uno de los más significativos [3], ya que debido a esto se realizaron cambios en las normas chilenas para la construcción de todo tipo de estructuras.

Gracias a la tecnología actual, es posible registrar estos movimientos sísmicos mediante acelerógrafos y sismógrafos, que proporcionan mediciones de la aceleración del suelo a lo largo del tiempo o la intensidad de los sismos mediante sensores electromagnéticos o electromecánicos que captan la energía liberada en la superficie [4, 5]. Esta información es crucial para comprender el comportamiento de los sismos con el tiempo y su impacto en diferentes tipos de estructuras, como estructuras flexibles, rígidas, con disipadores de energía, aislamientos sísmicos [6], bases rígidas o bases aisladas [7]. Todo esto conlleva a la implementación de nuevas tecnologías para prevenir el menor daño que se genera al ocurrir estos sismos, abaratar costos y tiempo de reparación y/o reconstrucción.

Además de los movimientos sísmicos, existen los movimientos armónicos que describen el movimiento periódico de un cuerpo. Estos movimientos son similares a los sismos naturales y se utilizan en estudios de ingeniería mediante ensayos armónicos, ya que son fáciles de reproducir, analizar y verificar para evaluar la efectividad de diferentes métodos y mecanismos en ingeniería.

En la actualidad, se utilizan mesas vibratorias para simular movimientos sísmicos a estructuras a escala real o a escala reducida. Con estos equipos se puede estudiar el comportamiento de las estructuras frente a diferentes tipos de excitaciones, y probar el comportamiento de distintos mecanismos de disipación de energía o aislamientos sísmicos [6, 8]. Estas mesas vibratorias o sísmicas se han utilizado desde hace mucho tiempo, pasando por mesas rudimentarias generando movimientos al girar una rueda unidireccional y con gran margen de error, hasta hoy en día que se utilizan motores de gran potencia, asemejándose a lo mayor posible a un sismo real sobre una maqueta o estructura a escala.

Los aislantes sísmicos cada vez son más comunes en nuestro país, siendo estos ya utilizados en grandes construcciones, así como en edificios antiguos para conservar su estructura arquitectónica. Además de implementarse en estructuras metálicas, salvaguardando la integridad de personas, así también del contenido importante que estos estén sosteniendo, minimizando los de pérdidas y daños de todo ámbito. A partir de estos motivos se realizó esta investigación, simulando diferentes situaciones sobre los aisladores sísmicos.

Uno de los métodos empleados en esta investigación fue la corroboración de manera experimental de los diferentes ensayos realizados al sistema de amortiguación, a partir de la información simulada en computacionalmente y los parámetros de rigidez, coeficiente de fricción, el cual caracteriza a los aisladores sísmicos que fueron implementados. Se realizaron distintos ensayos, pull-back, el cual consta de tensar el sistema cierta distancia, liberando este cuando la velocidad es nula. El siguiente ensayo consta de un impacto a corta distancia, alcanzando la mesa estática a cierta velocidad con que fue impulsado el impacto. Por último, el ensayo de la mesa vibratoria, el cual se aplica a la mesa una serie de movimiento armónico.

El objetivo de este estudio es la corroboración de parámetros teóricos que caracterizan al aislador sísmico como la constante elástica del resorte que lo compone, así como el coeficiente de fricción de este, así como su rigidez lateral de este mismo. Los datos experimentales obtenidos a través de los ensayos realizados, se compararon a través de modelamientos numéricos, obteniendo así la fidelidad de los datos.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo general

Calibrar parámetros de un modelo analítico de un sistema de aislamiento tipo rodadura, mediante ensayos experimentales, para ser usados en simulaciones numéricas.

Objetivos específicos

Determinar la rigidez lateral del sistema de aislamiento con base en el procesamiento de resultados de ensayos experimentales y mediciones directas.

Determinar el coeficiente de roce entre la rótula de bola y la base soportante del aislador (μ), por medio de ensayos experimentales.

Verificar la fidelidad del modelo numérico del sistema de aislamiento con parámetros calibrados y obtenidos previamente por medio de la comparación de resultados experimentales y numéricos.

2 METODOLOGIA

Se realizaron ensayos de vibración libre mediante la técnica de “tira y suelta” (pull-back), y frente a carga de impacto de corta interacción. En el primer tipo de ensayo el sistema se mueve en vibración libre con desplazamiento inicial conocido y velocidad inicial nula, en tanto en el segundo tipo el sistema se mueve en vibración libre con velocidad inicial no nula y desplazamiento inicial nulo. Con esto es posible observar el comportamiento del aislamiento sísmico y de la mesa, obteniendo así las propiedades dinámicas de la estructura en estudio y de los distintos elementos implicados. Con objetivo de observar y analizar si las señales descritas anteriormente tienen un mayor efecto sobre los aisladores empleados en el sistema de estudio, se realizó un tercer tipo de ensayo. En este, al sistema de aislamiento se le aplica un movimiento armónico simulado por una mesa vibradora uniaxial diseñada y construida en el marco del proyecto FONDEF ID19I10081, dirigido por el Dr. Nelson Maureira Carsalade. Para cada uno de los ensayos se colocan transductores de desplazamiento lineal y a través de un sistema de adquisición de datos se obtienen los registros de cada ensayo. Luego a través de un código en el software MATLAB se procesan los datos y se obtiene los parámetros de interés para calibrar los modelos numéricos.

Lo que se realiza en software MATLAB es la obtención de datos a partir de los LVDTs, transformándolos a desplazamientos mediante la ecuación de calibración de estos. Se obtienen las derivadas de velocidad y aceleración a partir del desplazamiento. Los datos simulados computacionalmente son evaluados en la ecuación dinámica del movimiento no lineal, obteniendo los datos para ser comparados con los valores experimentales.

A partir de los datos obtenidos de los ensayos experimental, teórico y computacional se calibrarán los parámetros del sistema de aislamiento sísmico. Obteniendo estos datos se corroborará la fidelidad de los parámetros.

2.1 Descripción de la mesa vibradora

La mesa en donde se realizarán todas las pruebas consta de una plataforma metálica móvil conformado por perfiles de aceros [13]. El desplazamiento de la mesa vibradora es facilitado mediante un sistema de rodamientos lineales que se mueven sobre rieles cilíndricos macizos. Un actuador electro-mecánico genera el empuje que permite movilizar la mesa vibradora. Este actuador es accionado por un servo-motor de 47 kW de potencia controlado por un PC vía PLC [9]. La mesa tiene un recorrido de 550mm y es capaz de reproducir movimientos genéricos en una dirección horizontal por medio de secuencias de movimientos

cortos de duración mínima de 20 milisegundos. Debido a la rapidez de reacción del servo-motor y a lo reducido del paso de tiempo utilizado, el movimiento resultante es fluido y con un muy buen ajuste a la señal de entrada que se desea reproducir, tanto en desplazamiento, velocidad y aceleración.



Figura 1: Mesa vibradora

2.2 Calibración de sensores LVDTs

Los sensores de desplazamiento del tipo LVDT, al igual que la mayoría de los instrumentos utilizados en ensayos de estructuras, miden de forma directa voltaje. Este voltaje medido es proporcional a la variable física que se busca medir con el instrumento, en el caso de los LVDTs, es proporcional al desplazamiento correspondiente al alargamiento del eje móvil del sensor. Para calibrar este tipo de instrumentos, se les debe imponer una serie de deformaciones o desplazamientos conocidos, para los cuales se mide el voltaje correspondiente, llamados puntos de control. Se construyen gráficos que muestran dichos puntos de control con el desplazamiento en el eje vertical y el voltaje medido en el eje horizontal para luego, por regresión lineal, definir la recta de calibración que convierte voltaje en desplazamiento. Si el instrumento tiene un comportamiento altamente lineal, la recta debería tener un número de correlación con los puntos de control R^2 cercano a 1. La pendiente de dicha recta es un indicador directo del incremento de desplazamiento en relación al incremento de voltaje medido. El voltaje generalmente se mide en un rango fijo que depende de las características del cDaq o tarjeta de adquisición de datos que transforma el voltaje medido en una señal digital discreta. En el caso del instrumental utilizado en el laboratorio el voltaje se mide en un rango de 0 a 10V, independientemente del recorrido del sensor LVDT. De esta forma, si el LVDT tiene un recorrido de 200mm, se esperaría que la recta de calibración tuviera una pendiente de aproximadamente 20 mm/V. La calibración se realiza de acuerdo al procedimiento antes descrito, para conocer con mayor exactitud la constante de calibración correspondiente a la pendiente de la recta ajustada a los puntos de control. Sin embargo, esta siempre debe ser cercana al recorrido del sensor dividido por el rango de medición de voltaje.

2.3 Descripción del sistema utilizado en los ensayos

En esta investigación se estudia el comportamiento dinámico de un sistema de aislamiento de base compuesto por cuatro aisladores de tipo rodadura [12], que sostienen una plataforma plana sobre la cual se instala un objeto masivo. La plataforma de piso actúa como diafragma rígido permitiendo que todo el sistema se mueva en conjunto con tres grados de libertad, dos desplazamientos horizontales ortogonales y una rotación de la planta. Este diafragma está compuesto por perfiles de aceros rectangulares de 40mmX80mm, diferente largo, vigas compuestas por pletinas soldadas por ambos lados de 4 mm y 6 mm, placas perforadas de 6 mm de espesor (Figura 2). En la parte inferior del diafragma se colocó una placa de acero de 6 (mm), adherida a un terciado estructural de 15 (mm) y una capa de goma sobre el terciado. Esto se realizó con la finalidad de mantener compactada la placa de acero contra el diafragma y la goma es para impedir el deslizamiento del aislador sísmico contra la estructura de ensayo, facilitando la rodadura. En la parte superior de este diafragma se instala el apoyo basal de las distintas estructuras que se utilicen en los ensayos, para los ensayos a realizar

se instalaron 4 bases cuadradas apernadas al diafragma, en donde se sostendrán las vigas de 270 (cm) de largo para apoyar un cajón de madera impermeabilizado.

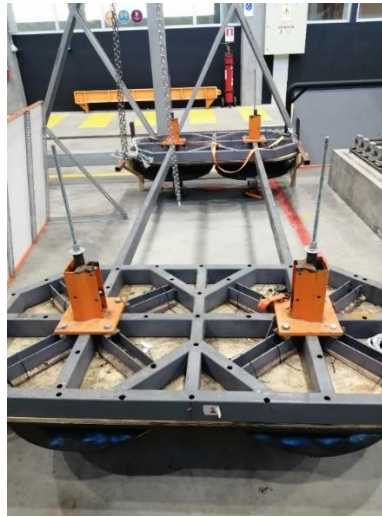


Figura 2: Diafragma rígido que conforma el sistema de aislamiento.

Sobre el diafragma de piso dispuesto sobre los aisladores, se colocó un cajón de madera impermeabilizado de 80cmX240cm, la cual puede ser llenada con aproximadamente 900 lt de agua hasta su tope. Este cajón con agua proporciona la masa adicional, siendo ensayado el sistema de aislamiento con estanque vacío y totalmente lleno, permitiendo así evaluar el efecto del aislamiento sísmico para distintos períodos de vibración.

2.4 Dispositivo de aislamiento

El aislador utilizado (Figura 3 y 4) es de tipo rodadura y está conformado por un soporte de rótula de bola ubicado en la parte inferior de éste, sobre él se encuentra la rótula de radio $r=3\text{mm}$, en donde el dispositivo es capaz de disipar la energía. En la parte central cuenta con un cuerpo cilíndrico hueco, en su interior se encuentra un resorte que se tensa mediante un cable unido a la parte superior del diafragma de piso, pasando por el centro del aislador hasta superficie o base de la plataforma. En dicha base se une a un hilo de metro de 12 mm de diámetro amarrándolo en un orificio en uno de sus extremos, para posteriormente ser tensado por una tuerca que irá comprimiendo el resorte en el interior de cada aislador. El aislador utilizado en su parte superior está conformado por un cascaron semiesférico con radio de curvatura $R=400\text{mm}$. El dispositivo presenta un mecanismo que permite variar su altura, dado que el cuerpo cilíndrico posee una disposición helicoidal de perforaciones para su apernado con separación de 8 mm en dirección del eje axial del cuerpo cilíndrico. Esto permite apernar el cuerpo del aislador a su cabezal semiesférico en 10 posiciones distanciadas 8 mm entre sí, pudiendo obtener alturas entre 328mm y 400mm. Para la realización de los ensayos la altura del dispositivo es constante, siendo $H=360\text{mm}$.



Figura 3: Aislador tipo rodadura.

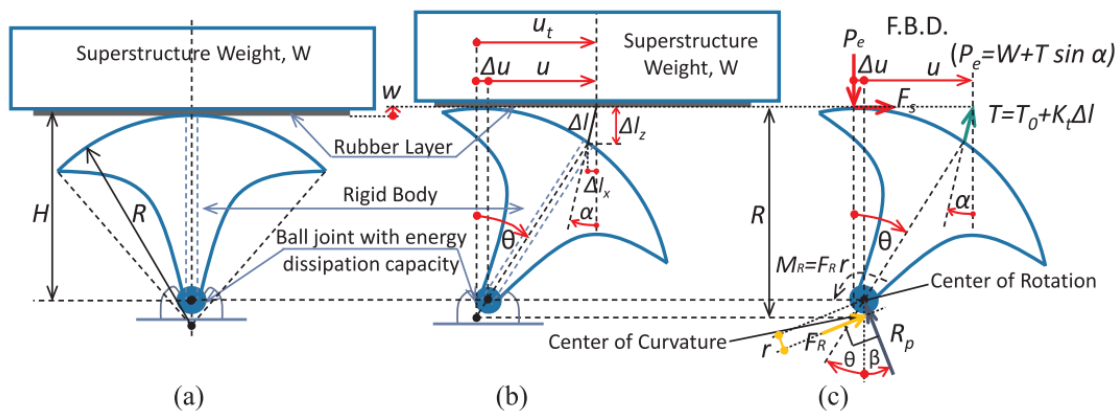


Figura 4: Aislador sísmico cinemático. (a) Posición de reposo inicial, (b) Posición deformada con grandes desplazamientos, (c) Diagrama de cuerpo libre para la condición deformada. Fuente [12]

Los parámetros utilizados del dispositivo constan de las siguientes características: la altura es de $H=360$ mm, el resorte posee una distancia de compresión del resorte $h_c=150$ mm, siendo la máxima compresión $h_c^{max}=248$ mm. El tipo de acero ocupado fue un ASTM A229 con módulo de corte $G=7,96 \cdot 10^5$ kg/cm², el diámetro del alambre del resorte es $d=8$ y el diámetro exterior de la espira es $D=80$, con $N_a=15$ espiras activas y constante de rigidez $k=7532$ N/m. La rigidez mencionada corresponde a la rigidez teórica del resorte y se calculó de acuerdo con la ecuación (1).

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \quad (1)$$

A partir de esta constante se pudo obtener también la carga de postensado del elemento elástico dentro del aislador. Esta se obtiene relacionando la altura de compresión del resorte y la constante de rigidez de este, dando como resultado $T_0=1.130$ N, calculado mediante la ecuación (2).

$$T_0 = k h_c \quad (2)$$

2.5 Ensayos experimentales

Se realizaron tres tipos de ensayos al sistema de aislamiento antes descrito: de impacto, de pull-back y de vibración forzada por movimiento de base. En todos los casos el objeto de estudio se instrumentó dos sensores de desplazamiento LVDT para medir la vibración de la plataforma dispuesta sobre los aisladores en la dirección del forzante en sus dos extremos. También se instrumentó la mesa vibradora sobre la cual se instaló el objeto de estudio, por medio de sensores de aceleración y de desplazamiento LVDT. Los tres tipos de

ensayos se repitieron en reiteradas ocasiones en cada una de las dos configuraciones estructurales consideradas, en las que se modificó la masa dispuesta sobre la plataforma instalada sobre el sistema de aislamiento.

2.5.1 Ensayo de golpe Directo o Impacto

El ensayo de golpe directo se utilizó un mecanismo similar a un péndulo que actuó como ariete. Éste se colgó un sistema compuesto por elementos masivos, se levantó dicho conjunto hasta el punto máximo que permitía el mecanismo y se soltó impactando en la parte superior de la mesa vibradora. Esto generó un pequeño movimiento de dicha mesa y, por consecuencia, un movimiento relativo del diafragma que sobre los cuatro aisladores sísmicos (Figura 5).



Figura 5: Ensayo golpe directo (vista posterior).

2.5.2 Ensayo de pull-back

El ensayo pull-back se realizó mediante un sistema compuesto de una polea, con la cual se tensó un cable de acero unido a unas cadenas, las cuales daban paso a otro cable sujetado al diafragma en sus dos extremos opuestos, permitiendo así una tensión en el centro geométrico del sistema de aislamiento (Figura 6). Esto con la finalidad de generar una fuerza uniforme sobre la estructura evitando imponer torsión al sistema. Para medir la tensión a la cual estaba sometido el sistema, se colocó un dinamómetro en la unión del cable de acero con las cadenas. Al estar completamente tensado, se procedía a cortar el cable de acero, dejando en vibración libre al sistema de aislamiento. Cabe destacar que la mesa esta sujeta y anclada, impidiendo así el movimiento de ésta, por lo que la deformación se concentró solamente en el sistema de aislamiento.



Figura 6: Vista lateral derecha Ensayo pull-back

2.5.3 Ensayo con mesa vibradora

Este tipo de ensayos se llevaron a cabo utilizando la mesa vibradora accionada por un servomotor controlado por PLC mediante computadora, teniendo la capacidad de ser muy precisa en posición al inicio, pero en el tramo final donde los desplazamientos son menores y más seguidos, la mesa no logra reproducir de la mejor manera el tren armónico. La secuencia de movimiento impuesta por la mesa vibradora y a la cual fue sometido el sistema de aislamiento corresponde a un tren de movimientos armónicos el cual se puede observar en la Figura 7 (a), (b) y (c). Esta secuencia tiene la particularidad de pasar por distintas frecuencias y amplitudes, coincidiendo su espectro de respuesta en las frecuencias de cada movimiento armónico del tren, con el espectro de diseño de la NCh433 para suelo tipo C y zona sísmica 3. Por lo tanto, el sistema de aislamiento se sometió a un movimiento que emula el efecto de un sismo de diseño.

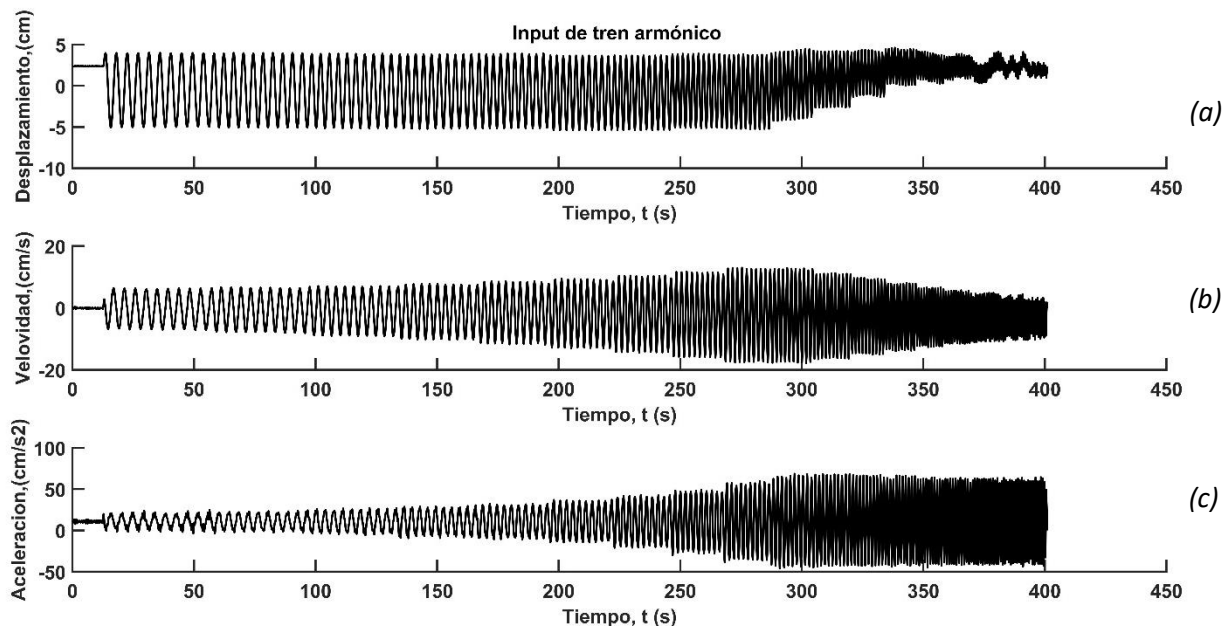


Figura 7: Input de tren armónico. (a) desplazamiento. (b) velocidad. (c) aceleración.

2.6 Procesamiento de datos

Se utilizó el software Matlab para procesar la información obtenida en los ensayos realizados experimentales mencionados anteriormente. A partir de los datos obtenidos de los transductores de desplazamiento, mediante una calibración realizada a todos los sensores ocupados en los distintos ensayos, se obtuvieron las series de tiempo de desplazamientos del diafragma del nivel de aislamiento. Además de obtener el desplazamiento, se pudo determinar las series de tiempo de velocidad y aceleración de estos mediante derivación numérica utilizando transformada de Fourier, obteniendo así las graficas de las distintas series de tiempo

Cabe señalar que se utilizaron dos sensores de desplazamiento tipo LVDT para medir el movimiento relativo del sistema de aislamiento respecto de la mesa vibradora. Estos sensores se ubicaron en extremos opuestos del diafragma, con la finalidad de caracterizar el movimiento de su centro de masa y la rotación de la planta. El primero se determinó como el promedio de las mediciones de ambos sensores, en tanto el giro se determinó como la diferencia entre ellos dividida por la distancia que separa los puntos de medición.

Para generar los datos computacionalmente, se toman las condiciones iniciales para los distintos casos de ensayos, para el ensayo de pullback su velocidad inicial es nula y su desplazamiento inicial máximo, para el

ensayo de impacto se invierten estas condiciones y para el ensayo de la mesa, las condiciones de velocidad y desplazamientos iniciales son nulos, pero su aceleración aplicada a la mesa mediante el input de tren de movimiento armónico (Figura 7). y el forzante para el ensayo de impacto u_m . Se genera una fuerza no lineal a partir del aislador sísmico, ya que este aporta a la rigidez del sistema, así como la viscosidad del mismo, el sistema considera 1 solo grado de libertad de movimiento horizontal u_a nombrado anteriormente se puede observar en la Figura 8. A partir de todos esto se resuelve la ecuación dinámica del movimiento no lineal de manera computacional, arrojando así los datos de desplazamiento, velocidad, aceleración relativa y absoluta, dependiendo de los ensayos realizados.

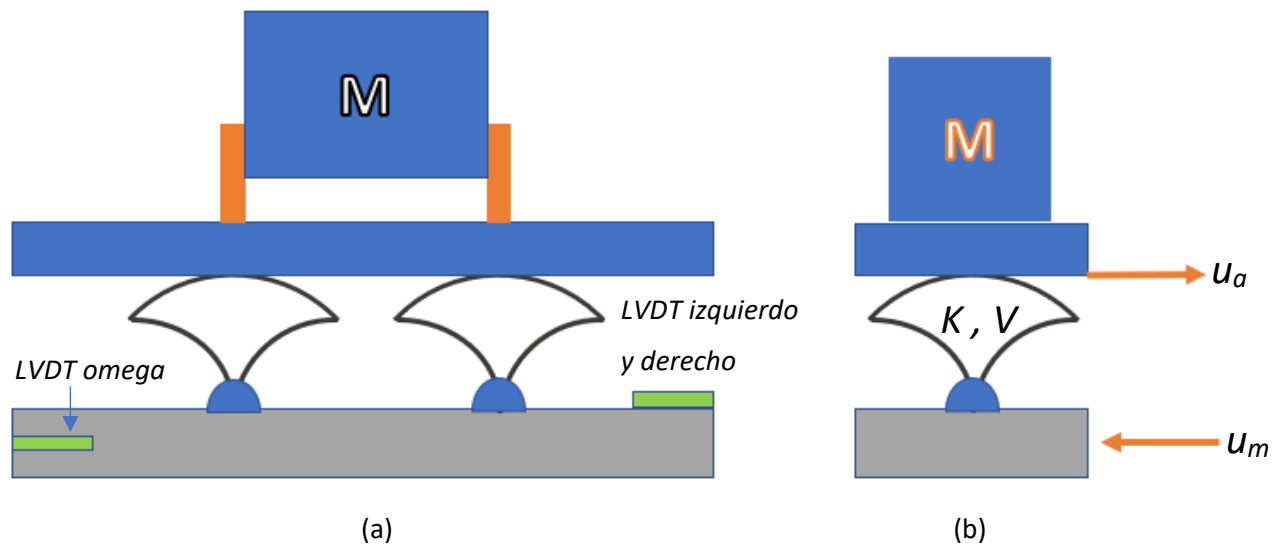


Figura 8: Representación gráfica (a) disposición de los LVDTs. (b) Modelo del sistema no lineal para un grado de libertad de movimiento horizontal.

2.7 Calibración de parámetros del sistema de aislamiento

Se formuló un modelo de comportamiento no lineal del sistema ensayado experimentalmente (Figura 9). Este modelo considera sólo 1 grado de libertad de movimiento horizontal u_a , ya que la masa se asume simétricamente distribuida y los cuatro aisladores se consideran iguales Me . El modelo considera el comportamiento elástico del aislador debido a la tensión T_0 del elemento elástico de rigidez k en su interior. También se considera el efecto del peso propio en del sistema aplicada sobre él en el cálculo de su respuesta no lineal. Además, se considera la disipación de energía por roce en la rótula de bola de su apoyo basal, donde la bola de acero está en contacto con deslizamiento contra su soporte también de acero, con coeficiente de roce μ . En el modelo numérico se considera constante el valor de T_0 , ya que fue medido experimentalmente, pero se consideran parámetros por calibrar los valores de k y μ .

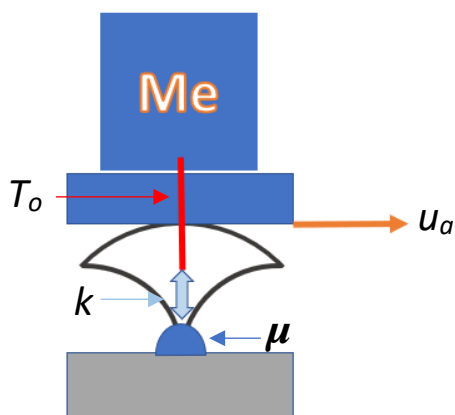


Figura 9: Representación del aislador sísmico para un sistema de un grado de libertad horizontal.

Como es el caso del coeficiente de rigidez del resorte el cual se determinó teóricamente siendo $k=7.532$ (N/m), así también el coeficiente de fricción al no saberse con certeza tomaremos un valor de $\mu=0,3$, ya que aproximadamente ocurre la fricción entre acero-acero.

Se realizaron simulaciones numéricas en torno al parámetro μ con el fin de calibrar dicho parámetro del modelo de análisis con base en los resultados experimentales obtenidos. Para esto se tomó el valor de la constante de rigidez teórica siendo $k=7.532$ N/m. Del mismo modo se generó un vector de valores de coeficiente de roce que toma los siguientes valores $\mu=[0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0]$ Se realizaron corridas numéricas de todas las combinaciones de parámetros obtenidos entre los diferentes valores de μ del vector antes indicado. Los resultados numéricos son comparados con los resultados experimentales, pero tomando una parte de los valores obtenidos para estos últimos. Debido a que los ensayos poseen mucha información, siendo una gran parte irrelevante, es extraída la información para una ventana de tiempo donde la respuesta es más intensa, omitiendo la respuesta nula o cercana a cero. Debido a que el modelo de análisis es de 1 grado de libertad, los resultados experimentales con los que se contrastan se obtuvieron como promedios de las mediciones de los 2 LVDT ubicados en bordes opuestos del diafragma con aislamiento de base. En esta sección se consideran los resultados de los distintos ensayos comparándose con resultados numéricos para calibración de parámetros k y μ .

Se definió y calculó un parámetro de error relativo entre respuesta numérica y experimental (Ec. 3) al contrastar la serie de tiempo de respuesta experimental con una (y cada una) de las respuestas numéricas calculadas. Esto asigna un error porcentual al par ordenado (k, μ) con el que se calculó la respuesta numérica, permitiendo discriminar las mejores combinaciones de dichos parámetros como aquellas que conducen a un menor error relativo.

$$\% \text{ Error} = \frac{\|u_{exp}(t) - u_{num}(t)\|}{\|u_{exp}(t)\|} \quad (3)$$

A partir de los ensayos nombrados con anterioridad, se puede determinar la rigidez lateral del sistema de aislamiento sísmico K_l para los distintos ensayos y casos (Ec 4). La rigidez lateral se obtiene a partir de la masa total M , la cantidad de aisladores sísmicos nt y el periodo de amortiguamiento T_a del sistema, esto lo podemos observar con la siguiente ecuación.

$$K_l = \frac{M}{nt} \left(\frac{2\pi}{T_a} \right)^2 \quad (4)$$

Mediante los ensayos se obtendrá el valor aproximado del coeficiente de roce μ a partir del porcentaje de error (Ec 3), esto obtiene a partir de la energía disipada por el aislador sísmico Ed . Para determinar este valor se tomará como referencia el ensayo de pullback en sus 2 casos (estanque vacío y lleno), ya que este ensayo no se ve afectado el movimiento relativo del aislador sísmico respecto a la mesa, porque esta se encuentra anclada. A partir de esto se tomo los valores experimentales del desplazamiento u y la aceleración a de estos. Para la disipación de energía se toma el momento M_0 y el desplazamiento de giro del aislador sísmico u_θ . El momento se compone de la masa distribuida a un aislador sísmico ($nt = 4$), la aceleración y su radio de curvatura R , el cual podemos observar en la ecuación 5 (Ec 5). El desplazamiento radial se obtiene mediante el desplazamiento y el ángulo θ del aislador (Figura 4 (c)).

$$M_0 = \frac{M}{nt} a R \quad (5)$$

Al graficar el momento y el desplazamiento radial, se toman todos los datos observados en un ciclo pasado por el punto 0. La energía disipada se obtiene mediante el área bajo la curva del ciclo ya mencionado, al tener este resultado la energía disipada será igualada a la ecuación 6 (Ec 6), en donde se tomará la diferencia máxima del desplazamiento del giro Δu_θ , la aceleración de gravedad ($g=9.81 \text{ m/s}^2$), el radio de la bola ($r=0.03 \text{ m}$), la masa distribuida sobre el aislador sísmico y el coeficiente de roce. El valor del coeficiente de roce se asume como incognito, por lo que la ecuación 6 se despeja, obteniendo así el coeficiente de roce en la ecuación 7 (Ec 7).

$$Ed = 2 \Delta u_\theta \mu g r \frac{M}{nt} \quad (6)$$

$$\mu = \frac{Ed}{2 \Delta u_\theta g r \frac{M}{nt}} \quad (7)$$

3 RESULTADOS Y ANALISIS

Los gráficos de la Figura 10 muestran los resultados del proceso de calibración de los sensores LVDT utilizados para registrar el movimiento de la mesa vibradora respecto de sus fundaciones y del diafragma sísmicamente aislado respecto de la mesa vibradora. Los gráficos muestran el número de correlación entre la recta ajustada y los puntos de calibración, la cual de ambos casos fue mayor a 0.995, indicando que los instrumentos tienen comportamiento lineal. Las ecuaciones de calibración se muestran en cada gráfica de la Figura 10. Lo relevante de dichas ecuaciones es la pendiente de la recta (medida en cm/Volt), ya que indica cuánto varía el desplazamiento medido indirectamente, por cada voltio registrado por el sensor. Dichas ecuaciones fueron ocupadas en Matlab para realizar la transformación de voltaje a desplazamiento. Estos desplazamientos posteriormente se multiplicaron por cuatro, debido a que los LVDTs se instalaron con un sistema de poleas móviles dobles. Esto ya que el recorrido de desplazamiento esperado máximo era mayor al recorrido o capacidad de los sensores, por lo que se optó por las poleas móviles para ampliar su rango de medición en un factor de cuatro.

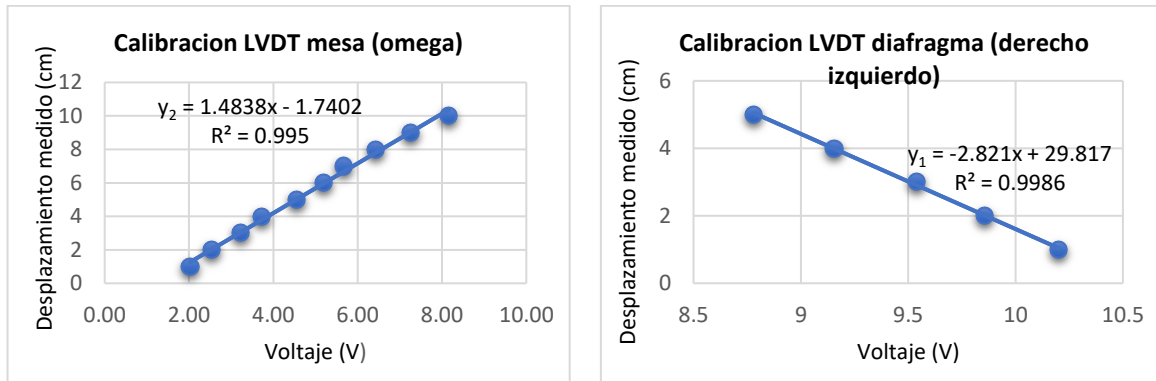


Figura 10: Gráficos de calibración de los distintos LVDT.

3.1 Ensayo de golpe directo o impacto

Este tipo de ensayo se dividió en dos subtipos: con estanque vacío y con estanque lleno. Esto se hizo así ya que, al cambiar la masa, cambia también el período del sistema con aislamiento de base, por lo que se puede esperar diferentes respuestas ante un mismo forzante impulsivo o de impacto.

3.1.1 Con estanque vacío

Las Figuras 9 muestra los resultados procesados de desplazamiento y velocidad relativa del sistema de plataforma con aislamiento de base y desplazamiento, velocidad y aceleración absoluta de la mesa vibradora, graficadas en función del tiempo. Se observa el desplazamiento, velocidad y aceleración que presentó el sistema de aislamiento con el estanque vacío. En este ensayo el desplazamiento inicial es nulo, ya que el sistema está en reposo absoluto esperando el input del golpe aplicado. En las Figuras 11 (a), (b) y (c) se observa el promedio de los LVDTs. Como se observa en la Figura 10 (a) el período amortiguado es $T_d \approx 0.76$ s, el cual se obtiene mediante la diferencia de tiempo de un ciclo de onda, tomando las crestas o valles de la onda.

La línea negra en la Figura 11 representa el promedio de los LVDTs y la línea roja es un extracto de los datos promedios, en donde para el ensayo de golpe directo se toma el valor máximo de velocidad en adelante, tomando aproximadamente 2 ciclos de onda.

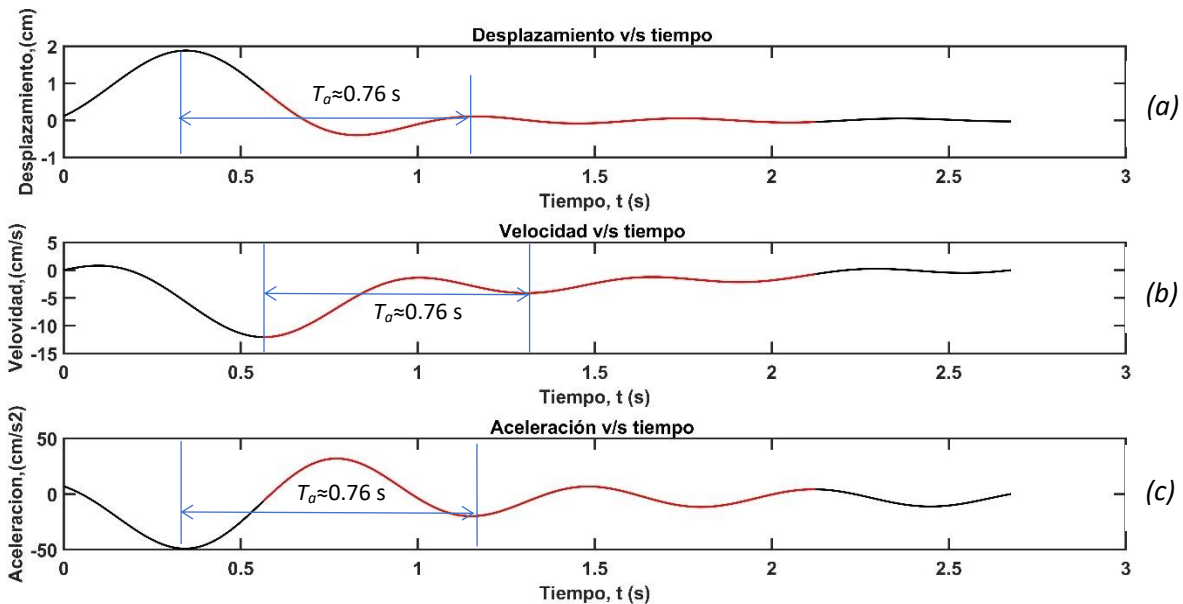


Figura 11: Resultados del sistema de aislamiento. (a) desplazamiento. (b) velocidad. (c) aceleración.

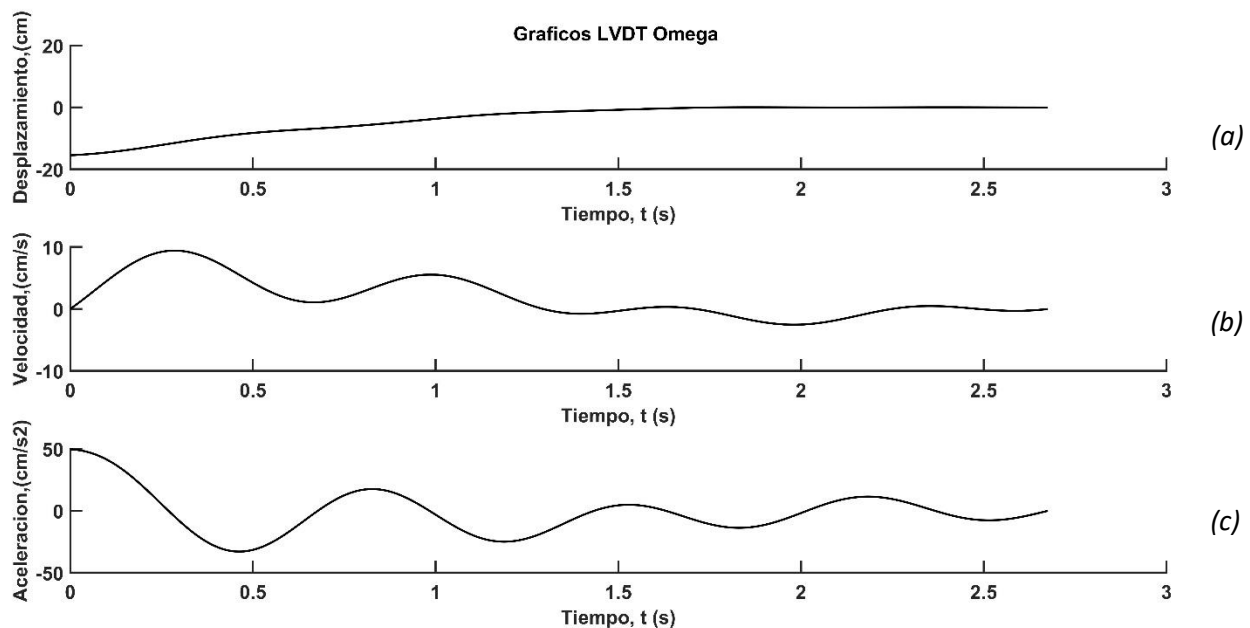


Figura 12: Resultados de la mesa. (a) desplazamiento. (b) velocidad. (c) aceleración.

En los gráficos del LVDT omega, Figura 12 (a),(b) y (c), se observa el comportamiento que tuvo la mesa vibradora al recibir el golpe, en donde vemos que al momento de ser golpeada esta inició el movimiento hasta detenerse unos segundos después. La mesa queda deformada, pero tanto la velocidad como la aceleración decaen hasta hacerse cero en un par de segundos.

3.1.2 Con estanque lleno

En la Figura 13(a), (b) y (c) se muestran los resultados de golpe directo con el estanque lleno. Se puede observar que poseen un comportamiento similar al del ensayo de golpe directo con el estanque vacío. Sin embargo, el período de oscilación es más largo que en el caso con estanque vacío, dicho período se incrementa teóricamente en un factor igual a la raíz cuadrada del cociente de las masas de diafragma más estanque lleno, y diafragma más estanque vacío, siendo el período amortiguado de $T_d \approx 0.87$ s.

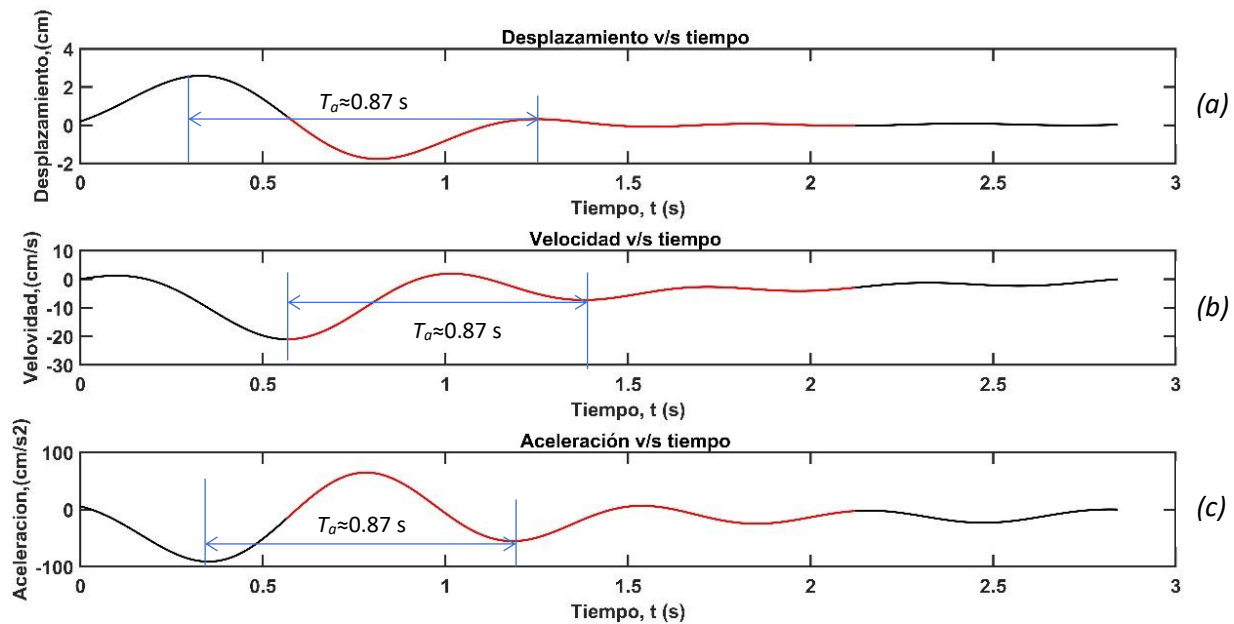


Figura 13: Resultados del sistema de aislamiento. (a) desplazamiento. (b) velocidad. (c) aceleración.

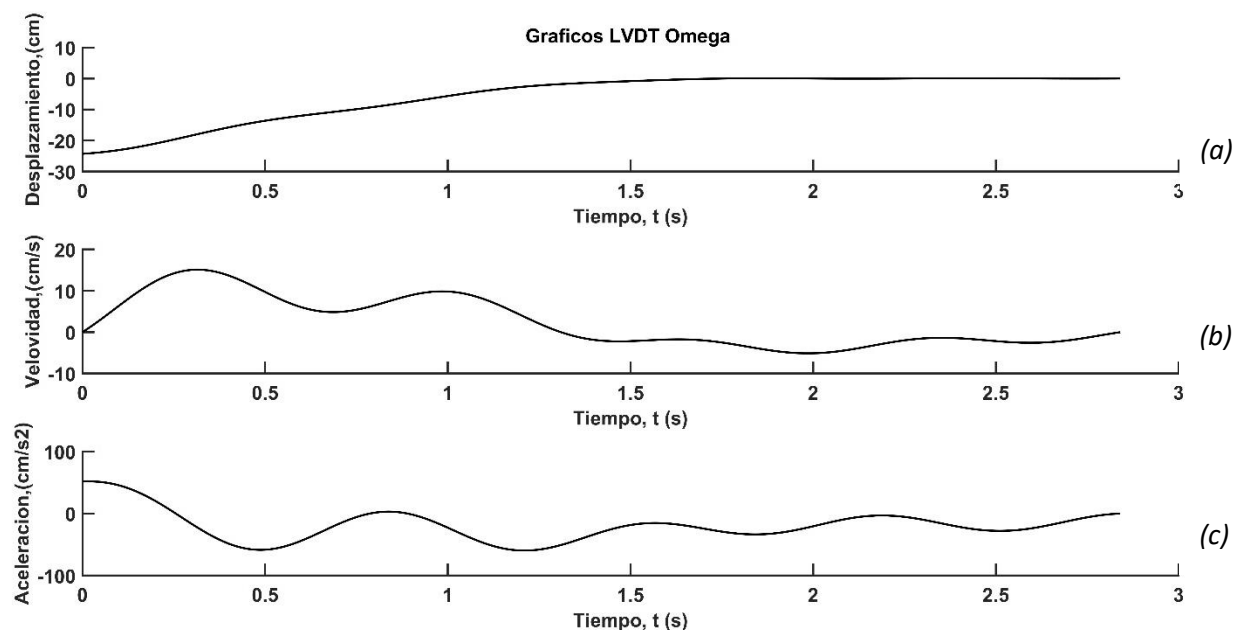


Figura 14: Resultados de la mesa. (a) desplazamiento. (b) velocidad. (c) aceleración.

En la Figura 14 (a) se observa un desplazamiento inicial mayor que el observado en la Figura 13 (a), esto se debe a que en este ensayo no se pudo controlar de manera exacta el input aplicado a la mesa.

3.2 Ensayo de pull-back

En este ensayo la respuesta de la estructura no se ve influenciada por las características del forzante, en particular su contenido de frecuencia, ya que la vibración es libre. Es decir, la respuesta vibratoria depende únicamente de las propiedades dinámicas del sistema ensayado y la amplitud de dicha respuesta es, en teoría, proporcional a la amplitud del desplazamiento inicial impuesto. Al igual que los ensayos de impacto, este tipo de ensayo se realizó en dos condiciones, con estanque vacío y con estanque lleno de agua. Esto para contar con respuesta en condición de período de oscilación corto (estanque vacío) y período de oscilación largo (estanque lleno), pudiendo observar el efecto de la disipación por roce en ambos casos.

3.2.1 Con estanque vacío

En las Figuras 15 (a), (b) y (c) se muestran los resultados experimentales procesados de los ensayos de pull back del sistema con estanque vacío. Se puede observar un desplazamiento inicial impuesto de forma manual por un sistema de cables y cadenas tensado por medio de un teclé mecánico. Al soltar el sistema de tensado de forma abrupta el sistema de diafragma con aislamiento de base comienza a oscilar respecto de su posición de reposo, Figuras 15 (a), (b) y (c). A partir de dichas figuras se puede determinar el período de vibración amortiguado, el cual resultó ser $T_a \approx 1.17$ s.

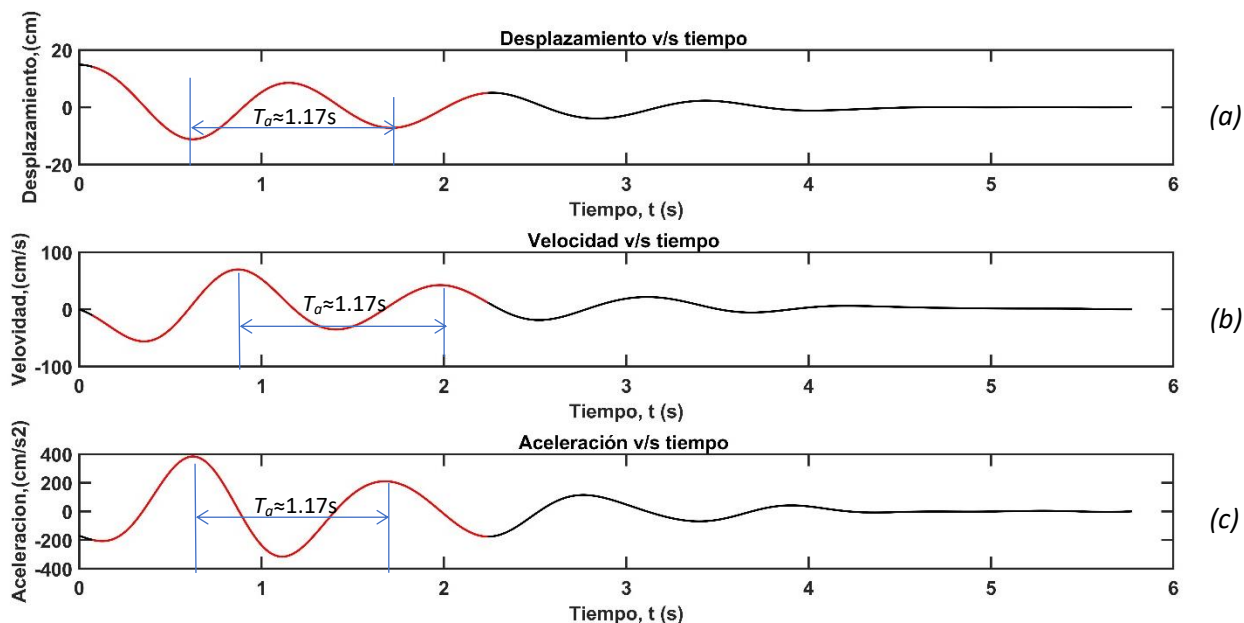


Figura 15: Resultados del sistema de aislamiento. (a) desplazamiento. (b) velocidad. (c) aceleración.

3.2.2 Con estanque lleno de agua

Se observa una diferencia de desplazamientos entre el estanque lleno (Figura 16 (a)) respecto al estanque vacío (Figura 15 (a)). El tiempo en donde alcanza el equilibrio nuevamente el sistema se ve disminuido en la Figura 14, estando en el tiempo $t \approx 3.6$ s, en comparación a la Figura 16 alcanzando su equilibrio en un tiempo $t \approx 4.7$ s. Además se obtiene que el periodo de amortiguamiento es de $T_d \approx 1.38$ s.

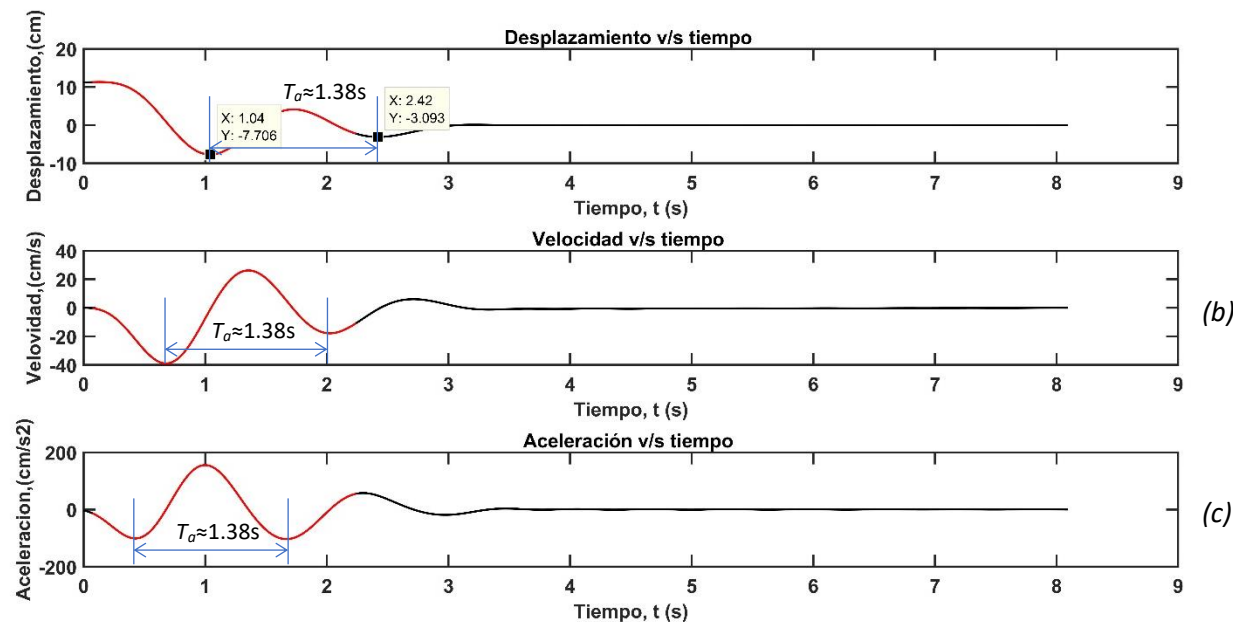


Figura 16: Resultados del sistema de aislamiento. (a) desplazamiento. (b) velocidad. (c) aceleración.

3.3 Resultados de ensayos con movimiento forzado de base

En este ensayo el forzante fue impuesto en la forma de un movimiento de base generado en mesa vibradora. Se analizaron dos configuraciones del sistema de diafragma con aislamiento de base, uno con estanque vacío y otro con estanque lleno de agua. Esto con el fin de evaluar el efecto de la masa y, por ende, diferentes períodos de aislamiento, en la respuesta del sistema.

3.3.1 Con estanque vacío

En las Figuras 17 (a), (b) y (c), se muestra el comportamiento que tuvo el sistema sísmicamente aislado al ser sometido a un movimiento de base correspondiente al tren de armónicos. Se observa que alrededor del tiempo $t=363s$ el sistema alcanzó su mayor desplazamiento, velocidad y aceleración. Esto se debe a que en ese instante la frecuencia del forzante igualó a la frecuencia del sistema estudiado, entrando éste en resonancia. En la Figura 17 (a) se observan 2 puntos tomados, donde están los mayores desplazamientos, también se obtiene el periodo amortiguado siendo de $T_a \approx 1$ s.

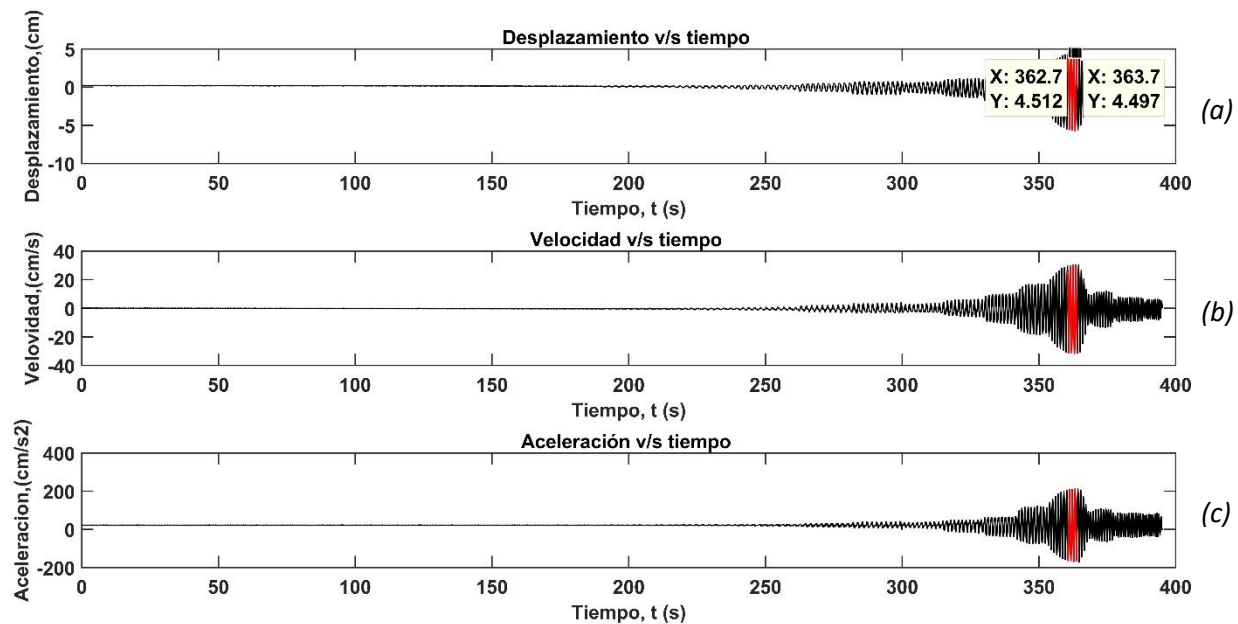


Figura 17: Resultados del sistema de aislamiento. (a) desplazamiento. (b) velocidad. (c) aceleración.

3.3.2 Con estanque lleno de agua

En los resultados de estanque lleno, se ve una pequeña disminución del desplazamiento máximo relativo, velocidad relativa y aceleración máxima alcanzados por el sistema en estudio (Figuras 18 (a), (b) y (c)). En ambos casos, con y sin agua en el estanque, el sistema alcanza la resonancia al igualarse la frecuencia del forzante con la del sistema. Esta ocurre en una vecindad del tiempo $t=3$ s. Esto significa que no hay un cambio significativo en el período de vibración del sistema estudiado, siendo su periodo de amortiguado $T_a \approx 1$ s, lo cual se explica este último está más fuertemente controlado por la relación R/H y no por la tensión T_0 del elemento elástico en el interior de cada dispositivo de aislamiento.

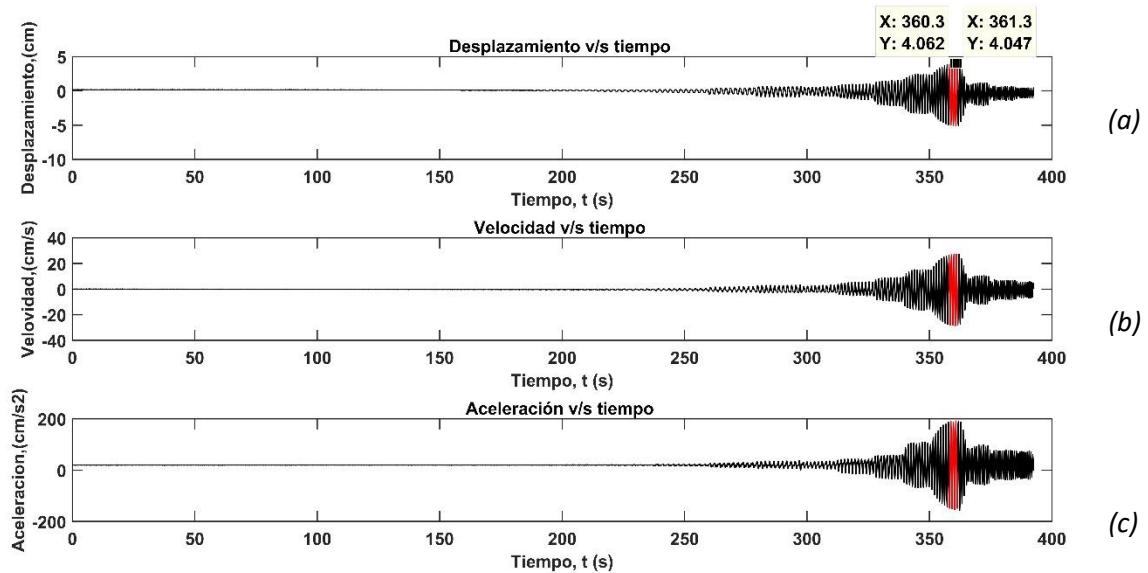


Figura 18: Resultados del sistema de aislamiento. (a) desplazamiento. (b) velocidad.

3.4 Calibración de parámetros del sistema de aislamiento

En la Tabla 1 se observa la rigidez lateral del sistema de aislamiento sísmico, en donde el ensayo de impacto registra la mayor rigidez lateral en sus 2 casos (estanque vacío y lleno), esto se debe a que posee los periodos amortiguados de menor escala de los 3 ensayos. Para el ensayo de pullback ocurre todo lo contrario, ya que este posee los mayores periodos de amortiguamiento.

En la Tabla 2 se obtuvo la rigidez lateral de cada uno de los aisladores sísmicos, siendo la única diferencia con la Tabla 1, la distribución de la masa del sistema a los 4 aisladores sísmicos.

Tabla 1: Rigidez lateral del sistema de aislamiento sísmico.

		Estanque	
		Vacío	Lleno
Ensayo	Impacto	28950.6 J	68987.2 J
	Pullback	12215.6 J	28231.2 J
	Mesa	16721.9 J	52216.4 J

Tabla 2: Rigidez lateral del aislador sísmico.

		Estanque	
		Vacío	lleno
Ensayo	Impacto	7237.7 J	17246.8 J
	Pullback	3053.9 J	7057.8 J
	Mesa	4180.5 J	13054.1 J

En las Tablas 3 a la 5 se muestran los resultados del cálculo del error relativo (E_c 3) entre los diferentes casos de análisis numérico y la respectiva respuesta experimental. Estas tablas permiten discriminar el error relativo para obtener los valores calibrados u óptimos de los parámetros k y μ del sistema de aislamiento. Estos son aquellos para los cuales el error se minimiza, por lo tanto, el modelo numérico reproduce de la mejor manera posible los resultados experimentales, dadas sus limitaciones.

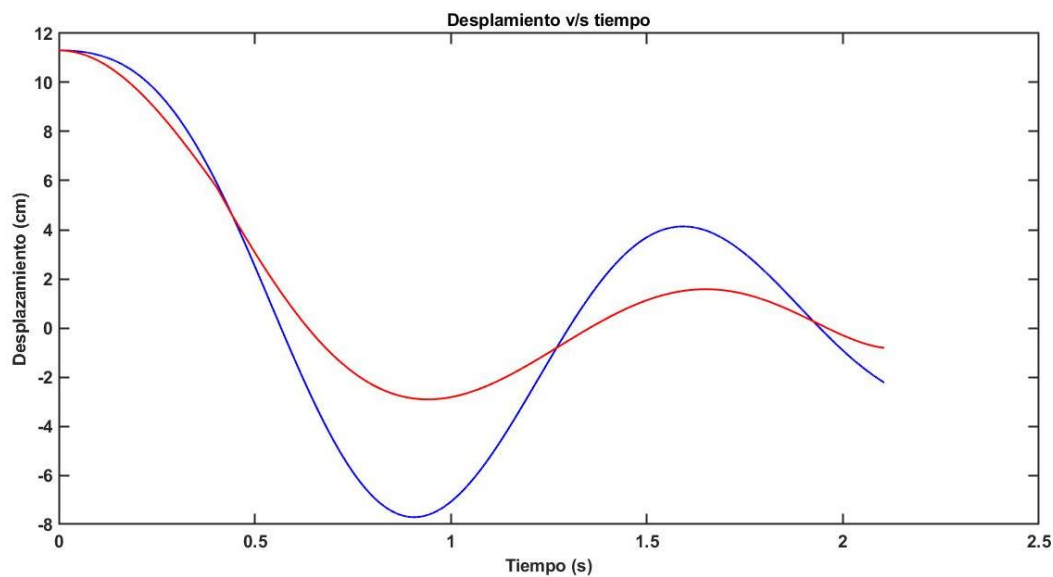
Tabla 3: Porcentaje de error Ensayo de impacto estanque vacío y lleno.

Error %	k (N/m)	
	Estanque vacío	Estanque lleno
	7532	7532
0.3	110.25%	102.20%
0.4	111.30%	102.62%
0.5	112.59%	103.16%
0.6	114.18%	103.86%
0.7	116.16%	104.75%
0.8	118.50%	105.82%
0.9	121.54%	107.34%
1	124.74%	108.84%

En la tabla 3 se observa que los valores son mayores al 100% de error, ya sea para el estanque vacío como para el estanque lleno. Los valores destacados de color azul representan el porcentaje de error más bajo, siendo de un coeficiente de fricción de $\mu=0.3$ para el ensayo de impacto con estanque vacío y lleno.

Tabla 4: Porcentaje de error ensayo de pullback estanque vacío y lleno

Error %	k (N/m)	
	Estanque vacío	Estanque lleno
	7532	7532
0.3	35.8%	32.5%
0.4	34.0%	30.9%
0.5	36.2%	33.1%
0.6	50.6%	35.0%
0.7	63.1%	36.9%
0.8	68.6%	39.2%
0.9	65.5%	41.8%
1	63.4%	45.0%


Figura 19: Resultados del % error entre datos experimentales y numéricos,

Para los ensayos de pullback podemos observar que el valor del coeficiente de roce es de $\mu=0.4$, el cual se encuentra destacado de color azul en la Tabla 4. También se ve un menor porcentaje de error entre los datos experimentales y numéricos respecto a los resultados obtenidos en la Tabla 3, siendo casi un tercio del error obtenido en el ensayo de impacto. En la Figura 20 se observa los datos experimentales (azul) y los numéricos(rojo) representando el % error del 30% del estanque lleno.

Tabla 5: Porcentaje de error ensayo de mesa estanque vacío y lleno.

Error %	k (N/m)	
	Estanque vacío	Estanque lleno
	7532	7532
0.3	63.18%	60.19%
0.4	63.67%	60.20%
0.5	64.25%	60.20%
0.6	64.95%	60.35%
0.7	65.79%	60.40%
0.8	66.82%	60.45%
0.9	67.95%	60.46%
1	69.22%	60.52%

En la Tabla 5 se observa que para los ensayos de la mesa vibradora se obtuvo un coeficiente de roce $\mu=0.3$, igual que para los ensayos de impacto (Tabla 3). Los resultados obtenidos son muy grandes no solo para este ensayo, sino para todos los realizados en este informe.

En la figura 20 se observa el momento vs el desplazamiento de giro para el ensayo de pullback con estanque vacío. La línea roja representa el ciclo que se tomó para determinar la energía disipada a partir del área bajo la curva, la cual se observa en la Tabla 6, siendo $E_d=7.56$ J y el coeficiente de roce $\mu=0.36$.

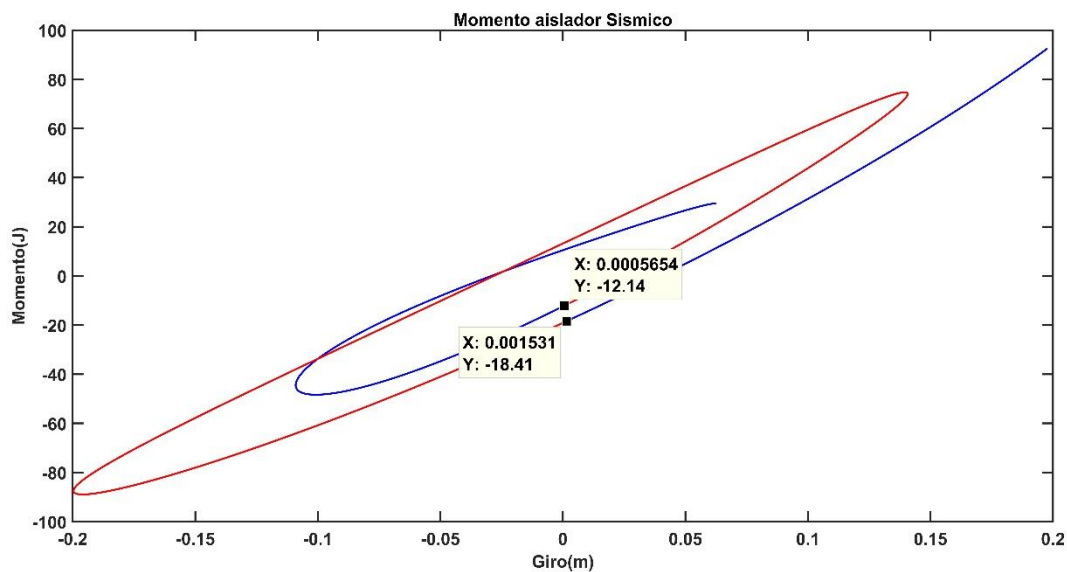

Figura 20: Resultados del momento y giro del ensayo de pullback estanque vacío.

Tabla 6: Energía Disipada y coeficiente de roce para ensayo de pullback.

	Energía	μ
Estanque vacío	7.56 J	0.36
Estanque Lleno	20.86 J	0.33

A partir de la Figura 21 se obtuvieron los resultados de la Tabla 7, en donde se observa que la energía para el caso del estanque lleno es mayor, $E_d=20.86$ J en comparación a la de estanque vacío. El coeficiente de roce que se obtuvo fue de $\mu=0.36$, siendo menor, al obtenido con el estanque vacío.

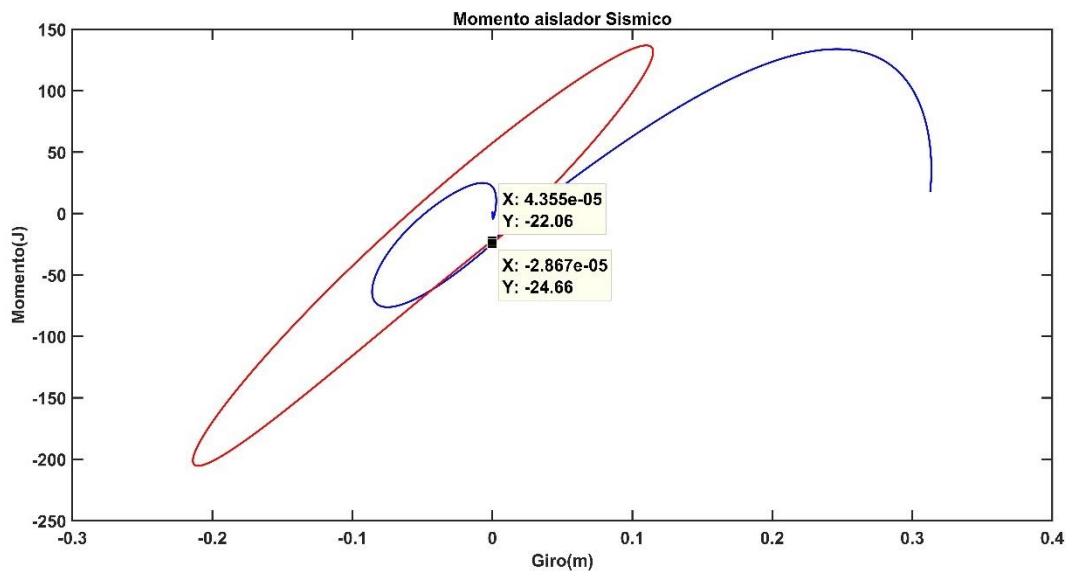


Figura 21: Resultados del momento y giro del ensayo de pullback estanque lleno.

4 CONCLUSIONES

Los datos obtenidos de manera experimental, no tuvieron una gran concordancia respecto a los datos simulados computacionalmente. Lo anterior se logró identificar viendo los resultados de los porcentajes de error donde se observan valores mínimos del 30% y máximos del 110%. Esto se puede deber a que la toma de datos mediante los LVDT fue errónea, ya que este constaba de un sistema de poleas que disminuían los desplazamientos y el cable que hacía todo el recorrido entre el sistema de aislamiento, poleas y sensor era axialmente flexible. Además, para obtener los datos de velocidad y aceleración se hicieron filtros de datos, ya que los LVDT al medir voltaje, también llegaban a medir pequeñas interferencias generadas por vibraciones ambientales y/o por vibraciones electromagnéticas lo cual en muchos segmentos se pierde información. Debido a esto se recomienda adquirir una mejor instrumentación, como acelerómetros y/o medidores de Voltaje con un mayor rango de registro para ensayos con mayor desplazamiento.

Los ensayos de pull back presentan un menor porcentaje de error de los datos, esto se debe a que la mesa al ser anclada el registro de información no es alterada, el forzante aplicado fue recibido solo por el sistema de aisladores sísmicos, no como en los otros ensayos que la masa de la mesa le aporta más rigidez al sistema.

La rigidez lateral del sistema de aislamiento se obtuvo a partir de los periodos de amortiguamiento obtenidos en los ensayos experimentales, en donde al añadir una masa de 900 Kg, la rigidez lateral aumentó aproximadamente un 138% para los ensayos de impacto y pullback.

Respecto al coeficiente de fricción, este se encuentra dentro de los rangos de $\mu=0.3$ y $\mu=0.4$ obtenidos de la correlación de ensayos experimentales y numéricos. Para el ensayo experimental de pullback se determinó el coeficiente de roce mediante la disipación de energía, el cual nos arrojó valores de $\mu=0.33$ y $\mu=0.36$, el cual están dentro del rango obtenido. Así también se concluyó que el coeficiente de elasticidad del resorte era lo más cercano al valor obtenido de manera teórica, respecto a los resultados de los datos experimentales siendo este el valor de $K=7532$ (N/m).

Se verificó la fidelidad del rango del coeficiente de roce obtenido de manera numérica y experimental pero no de un valor único como se esperaba. Para la rigidez lateral no se pudo determinar la fidelidad de estos, ya que al poseer un gran error entre los datos experimentales y numéricos no hubo la forma de corroborarlo.

5 REFERENCIAS

- [1]. Unidiversidad (4 de octubre, 2021), *Cinturón de Fuego del pacifico, 40 kilómetros que reúnen los peores terremotos y tsunamis*. <https://www.unidiversidad.com.ar/cinturon-de-fuego-del-pacifico-40-mil-kilometros-que-reunen-los-peores-terremotos-y-tsunamis>.
- [2]. CSN (4 de octubre 2021), *Grandes terremotos en Chile, Universidad de Chile*. Centro Sismológico Nacional.
- [3]. U.S.G.S (4 de Octubre 2021). *20 Largest Earthquakes in the World*. https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/science/20-largest-earthquakes-world?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.
- [4]. Salomón J., Pasten C., Ruiz S., Leyton F., Saez M., & Rauld R. (2020). *Shear wave velocity model of the Abanico Formation underlying the Santiago City metropolitan area, Chile, using ambient seismic noise tomography*. Geophysical Journal International.
- [5]. Zhenyu Bao, Jingyu Zhao, Pu Huang, Shanshan Yong & Xin'an Wang (2021). *A Deep Learning-Based Electromagnetic Signal for Earthquake Magnitude Prediction*. Sensors.
- [6]. Tagliaferro B., Montuori R. & Castellano M. G. (2021) *Shake table testing and numerical modelling of a steel pallet racking structure with a seismic isolation system*. Thin-Walled Structures.
- [7]. V Kilar, S Petrovčič, D Koren & S Šilih (2011). *Seismic analysis of an asymmetric fixed base and base-isolated high-rack steel structure*. Engineering Structures.
- [8]. E Jacobsen & R Tremblay (2017). *Shake-table testing and numerical modelling of inelastic seismic response of semi-rigid cold-formed rack moment frames*. Thin-Walled Structures.
- [9]. H Li, J Yang & Y Li (2019). *Structural Design and Characteristic Research of Product Vibration Test Fixture Based on High Frequency Response Characteristics*. 2nd World Conference on Mechanical.
- [10]. K Shirai, S Noro & KK Walsh (2021). *Shake table testing of a passive negative stiffness device with curved leaf springs for seismic response mitigation of structures*. Structural Control and Health
- [11]. J Lu, H Xie, L Hu, H Yang & Y Chen (2021). *Variable-parameter feedforward control for centrifuge shaking table based on nonlinear frequency characteristic model*. Mechanical Systems and Signal Processing.
- [12]. Maureira-Carsalade, N., Pardo, E., Oyarzo-Vera, C., & Roco, A. (2020). *A roller type base isolation device with tensile strength*. *Engineering Structures*, 221, 111003.
- [13]. R. Chamorro Salazar, N. Maureira Carsalade, E. Núñez Castellanos. (2020). *Análisis y selección de matriz de simulación de racks de almacenamiento industrial en base a respuestas máximas mediante análisis modal espectral y tiempo historia para ser ensayados en mesa vibradora*.