



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA



FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

INGENIERÍA CIVIL

SEDE BELLAVISTA

**DISEÑO, PROGRAMACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA
MESA SÍSMICA DE BAJO COSTO PARA LA REPRODUCCIÓN DE
MOVIMIENTOS SÍSMICOS**

Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil.

Profesor Tutor: Dr. Felipe Adolfo Vicencio Navarrete

Estudiante: Pablo Antonio Harcha Thomas



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA



© Pablo Antonio Harcha Thomas

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

Santiago, Chile

2024



Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mi familia, quienes durante todos los procesos de mi vida me han brindado el apoyo necesario, entregándome las enseñanzas y valores que me han permitido llegar lejos.

Una especial dedicatoria a mi madrina Faride, y mi tío Fuad, quienes antes de abandonarnos terrenalmente depositaron como siempre toda su confianza y amor en mí.

A mis amigos, de Valdivia, Santiago y Madrid, por ser siempre una mano de ayuda y una palabra de aliento en esos momentos difíciles, marcando su huella en el camino.

Finalmente, a mis profesores, quienes, a través de sus conocimientos y encanto por la enseñanza, contribuyeron con mi formación profesional y personal.

A todos ustedes, gracias.



AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos al Dr. Felipe Vicencio, docente de la carrera y mi tutor a lo largo de este trabajo, quien ha inspirado en mi un profundo gusto por la ingeniería estructural a lo largo de su paso como nuestro docente. A Fernanda Palacios, quien fue directora de la carrera de Ingeniería Civil, brindando un apoyo constante a todos sus estudiantes, manteniendo una cercanía y buena disposición con todos nosotros. Al Dr. Mauricio Sarabia, encargado del laboratorio donde realicé mi trabajo de tesis, siempre atento a mis necesidades y brindando apoyo a lo largo del trabajo en lo que fuese necesario.

Agradezco a los distintos docentes investigadores de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, quienes a través de sus palabras y muestras de cariño me alentaron a seguir y no bajar la cabeza, dándome ánimos en esas extensas jornadas de trabajo y ofreciendo su ayuda cuando sea necesario, muy especialmente a la Dra. Margareth Gutierrez y Dr. Marco Alsina, que sin falta alguna se desviaban desde sus oficinas para saber cómo estábamos y regalarnos un momento de distensión.

Finalmente, y no por ello menos importante, quiero agradecer a mis compañeros de clase, especialmente a Tiare, Benjamín, Francisco y Brad, quienes jamás dejaron de apoyarme, ayudarme o levantarme en caso de ser necesario.



Resumen

En este trabajo se desarrolló una mesa sísmica de baja envergadura, controlada por una placa Arduino UNO en el marco del apoyo a la docencia e investigación de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño de la Universidad San Sebastián. Se programó y calibró una rutina que, para el caso particular, permitió replicar la sección del movimiento fuerte del acelerograma correspondiente al sismo ocurrido el 27 de febrero del año 2010 en Chile, aplicando los criterios necesarios para que la operación se llevara a cabo según los márgenes impuestos por el diseño de la mesa.

Con el fin de demostrar la versatilidad de esta herramienta, se realizó una serie de pruebas de simulación de aislación sísmica geotécnica mediante la implementación de un bloque de espuma de polietileno sobre la placa deslizante de la mesa. A raíz de esto, se dedicó un pequeño capítulo que abarca la investigación relacionada a los sistemas de aislación sísmica geotécnica como alternativa a los métodos convencionales que se emplean hoy.

Con relación a los estudios expuestos y extraídos para las pruebas realizadas, se dejó abierta la entrada a dos fenómenos dinámicos que cobran alta relevancia en las investigaciones actuales sobre la respuesta de las estructuras frente a cargas sísmicas. Es por esto por lo que se dedicó un capítulo para realizar una breve introducción a los fenómenos de interacción estructura-suelo y estructura-suelo-estructura, con la finalidad de que aporte a la comprensión de los eventos que surgen en las investigaciones actuales respecto al comportamiento dinámico de estructuras, y así, que este documento a través de sus distintos capítulos sea una motivación para realizar ensayos que contemplen todas las aristas descritas y presentadas.

Los resultados obtenidos en el proceso demuestran la capacidad que se posee de manejo de herramientas, a través del análisis de datos y programación de rutinas adecuadas, para comprender de mejor manera los efectos que tienen las cargas sísmicas sobre las estructuras. Se logró crear una rutina específica para el control de un motor paso a paso NEMA 23 que permitió simular un acelerograma dentro de los márgenes esperados obteniendo aceleraciones basales máximas con un 95% de proximidad a la registrada durante el evento del 27 de febrero del 2010.

Por otra parte, las pruebas con espuma como simulación de un tratamiento geotécnico para la aislación sísmica confirmaron las hipótesis planteadas, obteniendo un promedio de disminución del 40% del PGA en comparación a las pruebas sin este método.

Palabras clave: Mesa sísmica, Arduino, aislación sísmica, programación, protección sísmica, estructuras.



Abstract

This work developed a low-profile seismic shake table controlled by an Arduino UNO board within the framework of supporting teaching and research at the Faculty of Engineering, Architecture, and Design of the Universidad San Sebastián. A routine was programmed and calibrated to replicate the strong motion section of the accelerogram corresponding to the earthquake that occurred on February 27, 2010, in Chile, applying the necessary criteria so that the operation was conducted according to the margins imposed by the design of the table.

To demonstrate the versatility of this tool, a series of simulation tests were performed on geotechnical seismic isolation by implementing a block of polyethylene foam on the sliding plate of the table. As a result, a small chapter was dedicated to investigating geotechnical seismic isolation systems as an alternative to conventional methods currently employed.

Regarding the studies presented and extracted for the tests performed, the entry to two dynamic phenomena that are highly relevant in current research on the response of structures to seismic loads was left open. This is why a chapter provided a brief introduction to soil-structure interaction and structure-soil-structure interaction phenomena, with the aim of contributing to the understanding of events that arise in current research regarding the dynamic behavior of structures. Thus, this document, through its various chapters, serves as motivation to conduct tests that consider all the aspects described and presented.

The results obtained in the process demonstrate the capacity to manage tools through data analysis and programming of suitable routines to better understand the effects of seismic loads on structures. A specific routine was created for controlling a NEMA 23 stepper motor, allowing the simulation of an accelerogram within the expected margins, achieving maximum basal accelerations with a 95% proximity to those recorded during the event of February 27, 2010.

On the other hand, tests using foam as a simulation of geotechnical treatment for seismic isolation confirmed the hypotheses proposed, obtaining an average reduction of 40% of the Peak Ground Acceleration (PGA) compared to tests without this method.

Keywords: Seismic shake table, Arduino, seismic isolation, programming, seismic protection, structures.



Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Justificación del Estudio.....	4
1.3. Objetivos.....	5
2. Ingeniería sismo resistente.....	5
2.1. Propiedades de los sismos	7
2.2. Disipadores de energía convencionales.....	9
2.3. Aislación sísmica convencional.....	11
3. Diseño y construcción de mesa sísmica de bajo costo	11
3.1. Componentes y organización de la mesa sísmica.....	13
3.2. Configuración del movimiento	14
3.3. Caracterización de la mesa.....	19
4. Proceso de replicación de un sismo real: Sismo 8.8 Mw – 27F	23
4.1. Análisis y manejo de datos para el proceso de replicación	26
4.2. Fase de control con Arduino UNO – motor NEMA 23	28
4.3. Modelo final funcional	32
5. Teoría de fenómenos de interacción y aislación sísmica geotécnica.....	33
5.1. Aislación sísmica geotécnica	37
6. Aplicación sobre la mesa sísmica: ensayos y resultados.....	40
6.1. Ensayos.....	41
6.2. Resultados.....	44
6.3. Resultados de pruebas con espuma	47
6.4. Recomendaciones a futuro	50
7. Conclusiones.....	51
8. Anexos	52
9. Referencias	60



Índice de elementos

Ecuación 1: Relación de rotaciones y desplazamientos lineales.....	18
Tabla 1: Comparativa entre mesas sísmicas estudiadas.....	12
Tabla 2: Valores de PGA registro original y pruebas.....	47
Tabla 3: Valores de PGA para pruebas con espuma (PE) y diferencias	49
Ilustración 1: Movimiento de placas tectónicas.....	6
Ilustración 2: Proceso de subducción	7
Ilustración 3: Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento.....	8
Ilustración 4: Resumen categorías de clasificación de sistemas de disipación de energía.	10
Ilustración 5: Espectro de respuesta para el movimiento del terreno de El Centro	10
Ilustración 6: Funcionamiento del mecanismo husillo-tuerca	13
Ilustración 7: Vista en planta AutoCAD 2022 con dimensiones en mm y ubicaciones principales	14
Ilustración 8: Prototipo primera interfaz	15
Ilustración 9: Ensamblaje motor y bases del husillo del modelo reducido	17
Ilustración 10: Modelo a escala reducida ensamblada completamente.....	17
Ilustración 11: Definición de los parámetros iniciales para el control del motor (datos de ejemplo).....	18
Ilustración 12: Sensor acelerómetro ADXL345.....	19
Ilustración 13: Diagrama funcional en bloque del sensor ADXL345 (Data sheet).....	20
Ilustración 14: Salida código Python con gráficos de aceleraciones	21
Ilustración 15: Acelerograma de primera prueba de calibración	22
Ilustración 16: Diagrama lógico de proceso en Matlab	24
Ilustración 17: Gráficos de las 3 componentes del sismo 8.8Mw 27F, Chile. Gráfico original y corregido.	25
Ilustración 18: Diferencias entre valores originales y de corrección.	26
Ilustración 19: Código en Python para la comunicación serial entre el script y Arduino. 28	
Ilustración 20: Aceleraciones del sismo 27F, lectura total y marca en el intervalo seleccionado.....	30
Ilustración 21: Valores para calcular R	30
Ilustración 22: Transformación de datos en base a revoluciones	31
Ilustración 23: Transformación de datos en base a pasos.....	32



Ilustración 24: Ilustración esquemática de un análisis directo de la interacción suelo-estructura en un medio continuo por medio de elementos finitos (NEHRP, 2012).	35
Ilustración 25: Modelo representativo para el análisis de la interacción estructura-suelo	36
Ilustración 26: Modelo idealizado del mecanismo de interacción entre 2 estructuras adyacentes	37
Ilustración 27: Descripción esquemática de un sistema de aislación sísmica	38
Ilustración 28: Esquema propuesto por Tsang (2008) para la aplicación de RSM.....	39
Ilustración 29: Vista de perfil del modelo final con la incorporación de espuma y placa superior.....	40
Ilustración 30: Acelerómetro ADXL345 sobre conjunto de placas y espuma para ensayo	42
Ilustración 31: Formato de ensayo completo y ensamblaje	43
Ilustración 32: Sección del acelerograma del sismo utilizado.....	44
Ilustración 33: Acelerograma prueba 1	45
Ilustración 34: Acelerograma prueba 2	45
Ilustración 35: Acelerograma prueba 3	46
Ilustración 36: Comparativa de acelerogramas: original vs. Pruebas	46
Ilustración 37: Acelerograma de prueba con espuma 1	48
Ilustración 38: Acelerograma de prueba con espuma 2.....	48
Ilustración 39: Acelerograma de prueba con espuma 3.....	49
Ilustración 40: Variación del PGA según tipo de ensayo.....	49



1. Introducción

La conocida ubicación de nuestro país en el denominado cinturón de fuego del Pacífico hace que la ingeniería sísmo resistente sea una disciplina de crucial importancia en nuestra filosofía como ingenieros civiles. A lo largo de los años de nuestra historia documentada, se han registrado sismos que han demostrado la necesidad de desarrollar una rama de la ingeniería civil dedicada a desarrollar estructuras resilientes y buscar continuamente las formas de hacerlas más efectivas, económicas y seguras. A pesar de los ya existentes avances en estas materias, existen fenómenos que requieren ser estudiados e investigados más profundamente para ser comprendidos de mejor manera y así generar un impacto cada vez más certero a la hora de plantear soluciones frente a los fenómenos dinámicos inducidos externamente a las estructuras.

Uno de estos fenómenos es la interacción estructura-suelo-estructura (SSSI por sus siglas en inglés), que hace referencia a como el comportamiento de una estructura incide en la respuesta de otra estructura cercana mediante el suelo como un puente de conexión y como las características del terreno intervienen en el comportamiento dinámico de una edificación (National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP), 2012). Los efectos de la SSSI pueden modificar de manera importante la respuesta de las estructuras, haciendo que su comportamiento sea más difícil de predecir y controlar bajo un contexto sísmico.

El estudio experimental de este fenómeno es crucial para mejorar metodología de diseño y potenciar el desarrollo de sistemas de protección sísmica. Uno de los problemas es que los equipos necesarios para hacer estos estudios, como las mesas sísmicas, suelen ser costosos, limitando el acceso a estas formas de investigación. Como alternativa, y en respuesta a esta necesidad, el presente trabajo propone el diseño, construcción y operación de una mesa sísmica de bajo costo, utilizando un microcontrolador Arduino para operarla. Esta propuesta tiene el potencial de ofrecer una solución accesible para el estudio de modelos estructurales a escala en el ámbito educacional e investigativo.



Por otro lado, se tiene el estudio de sistemas de aislación y disipación de energía de bajo costo, utilizando materiales y/o procesos alternativos a los tradicionales, que buscan una oportunidad de inserción al mundo de la protección sísmica por fracciones del costo habitual que tienen estas implementaciones en las estructuras, pero con índices de eficacia elevados, convirtiéndolos en una alternativa atractiva por la innovación, eficacia y costo.

El objetivo consolidado de este proyecto, entonces, es desarrollar una herramienta que permita contribuir a la investigación de los fenómenos sísmicos y su impacto en las estructuras, precisamente en aquellas que posean sistemas alternativos en cuanto a aislación sísmica y el impacto de esta implementación en el análisis experimental a escala del factor SSSI. Se busca que esta herramienta sea fácil de operar, económicamente viable de desarrollar y por sobre todo propia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Sebastián, donde académicos y estudiantes puedan verse beneficiados en el campo de la ingeniería sísmica, en particular en la realización de estudios experimentales a pequeña escala de sistemas estructurales sometidos a cargas sísmicas reales.

1.1. Planteamiento del Problema

Chile, uno de los países más sísmicos del mundo, históricamente ha experimentado fenómenos sísmicos de magnitudes elevadas, siendo estos devastadores, generando pérdidas humanas, económicas y sociales. Tomando en cuenta como punto de estudio el terremoto del 27 de febrero de 2010, se observó que producto del evento se consignaron 521 víctimas fatales, aproximadamente 15.000 puestos de trabajo fueron perdidos y un 75% de la población nacional se vio afectada por el siniestro (Contreras & Winckler, 2013). El costo del terremoto del 2010 fue de prácticamente 30 mil millones de dólares considerando daños en infraestructura y pérdida del producto interno bruto (PIB), además el costo fiscal fue de aproximadamente 6 mil millones de dólares, lo que significó el uso de mecanismos constitucionales para la reasignación de fondos de manera importante (Hacienda, 2023)



Pese a que Chile es un país caracterizado por su buen comportamiento estructural y social frente a eventos telúricos de consideración respecto a otros países, presentando pérdidas humanas reducidas en esta misma comparación, todavía existe la posibilidad de disminuir el impacto de la pérdida económica producida por los sismos y mejorar los números en cuanto a protección de la vida humana en eventuales eventos de importancia.

A pesar de los avances en la ingeniería estructural y sísmica destacados en Chile, siguen existiendo campos poco explorados en cuanto al comportamiento dinámico de las estructuras al verse sometidas a un sismo.

Uno de estos casos corresponde a la interacción estructura-suelo (SSI) y la interacción estructura-suelo-estructura (SSSI), fenómenos donde factores como las edificaciones cercanas, condiciones locales y tipo de suelo, afectan la respuesta dinámica de otra estructura, generando este grupo de factores un gran interés en su aplicación en ciudades donde la densidad poblacional aumenta drásticamente tendiendo a la disminución de espacios libres entre construcciones.

Estos estudios son de un carácter complejo debido a la variabilidad de los efectos que pueden verse reflejados en las construcciones y las propiedades del entorno que condicionan el comportamiento a medir. Pueden apreciarse fenómenos de incremento o disminución de las fuerzas actuantes sobre una estructura, dependiendo de las características locales antes mencionadas, afectando la estabilidad y la capacidad de resistir los fenómenos adversos. A pesar de la importancia de este proceso, los estudios experimentales han sido limitados, principalmente por factores técnico-económicos, debido a la poca oferta de equipos para ensayos disponibles y sus capacidades para analizar diferentes escalas.



1.2. Justificación del Estudio

El marco justificativo de este proyecto se asienta sobre la necesidad de mejorar la comprensión de fenómenos asociados a la interacción de estructuras con su entorno de fundación ante eventos sísmicos. Chile, por su elevada actividad sísmica, requiere soluciones avanzadas que se ajusten según la experiencia que se ha marcado a lo largo de los años. Aunque a nivel general los fenómenos de interacción estructura-suelo (SSI) e interacción estructura-suelo-estructura han presentado avances en cuanto a su investigación, aun son escasos los estudios experimentales y los resultados comprobados de estudios numéricos debido a la complejidad de acceder a herramientas que permitan simular fenómenos a escala.

Se busca también fortalecer los datos existentes respecto a métodos no convencionales de aislación sísmica, específicamente a la implementación de tratamientos geotécnicos en el proceso constructivo como una alternativa viable a los sistemas convencionales de aislación sísmica basal.

De esta manera, el presente trabajo abordará principalmente el proceso de diseño, ensamblaje y programación de una herramienta que permita simular un registro sísmico real, en este caso, el correspondiente al vivido el 27 de febrero de 2010. Para posteriormente validar una alternativa de aislación sísmica en base al tratamiento geotécnico del suelo de fundación.

Se dejará planteada la teoría de los fenómenos de interacción estructura-suelo y estructura-suelo-estructura para que el lector aborde de manera general estos conceptos y en caso de presentarse, este estudio sirva de base o motivación para combinar los fenómenos antes mencionados y estudiarlos considerando alternativas de aislación sísmica.



1.3. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es analizar experimentalmente la respuesta dinámica de un modelo a escala de suelo al ser sometidos a cargas sísmicas reales mediante el desarrollo y construcción de una mesa sísmica de baja envergadura mediante el proceso de adaptación y replicación de un registro sísmico real. Además, se pretende demostrar la versatilidad de esta mesa mediante la prueba a escala reducida de un modelo de suelo como alternativa a los sistemas convencionales, en este caso simulado por una capa de espuma de polietileno.

Dentro de los objetivos específicos se presentan algunos, tales como:

- Diseño y construcción de una mesa sísmica, contemplando componentes físicos, mecánicos y electrónicos.
- Desarrollar una rutina para procesar la información de un registro sísmico real, extraer los datos de relevancia para el caso y realizar un proceso de escalamiento para simular este movimiento.
- Efectuar ensayos dinámicos con cargas sísmicas reales y medir el comportamiento de un modelo a escala de suelo bajo el marco teórico de la aislación sísmica geotécnica como demostración de las capacidades de las herramientas desarrolladas.

2. Ingeniería sismo resistente

El Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (CSN, 2024), define un sismo como el “proceso de generación de ondas elásticas y su posterior propagación por el interior de la Tierra”. Estas ondas al llegar a la superficie terrestre son percibidas por los seres humanos y por las estructuras. Las componentes principales de estas ondas (desplazamiento, velocidad y aceleración del suelo) son las principales características de un sismo, las cuales inciden en la percepción de éste.

La generación de estos eventos tiene lugar debido a procesos naturales o humanos, tales como causas tectónicas, volcánicas o inducidos. Los dos primeros son los más comunes y habitualmente percibidos, pero son los sismos de origen tectónico a los que realmente apunta trabajar la ingeniería civil.

La teoría de tectónica de placas, relacionada estrechamente con la deriva continental (Veloza, 2021), se refiere al movimiento de las placas tectónicas (litosféricas) que componen la corteza terrestre.

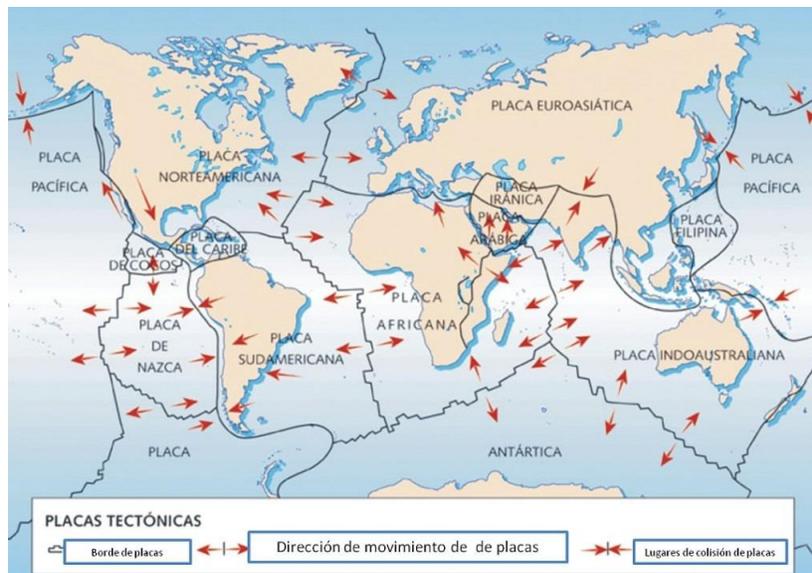


Ilustración 1: Movimiento de placas tectónicas

Para la zona central de Chile, se aprecia que la mayor cantidad de eventos sísmicos tienen origen debido a la sismicidad interplaca, es decir, en la zona de encuentro de dos placas (Leyton et al., 2010). En el caso concreto del territorio nacional, las principales placas que generan sismos son la de Nazca con la Sudamericana, donde la primera subduce a la segunda, es decir, la placa de Nazca se enfrenta a la Sudamericana siendo absorbida por esta última.

Este movimiento de subducción genera una importante acumulación de tensiones entre ambas placas, y tomando en cuenta un movimiento de subducción de aproximadamente

6 cm/año (Somoza & Ghidella, 2005), se hace evidente que en algún momento este movimiento debe fluir, liberando dichas tensiones acumuladas. Es normal en Chile sentir frecuentemente un denominado *temblor* (sismo de baja intensidad), lo que favorece la liberación paulatina de energía. El problema yace en las zonas donde no se libera continuamente energía, ya sea en forma de *temblores* o eventos sísmicos importantes en brechas relativamente continuas de tiempo, sumando importancia a una eventual actividad sísmica de consideración que pudiese afectar la zona.

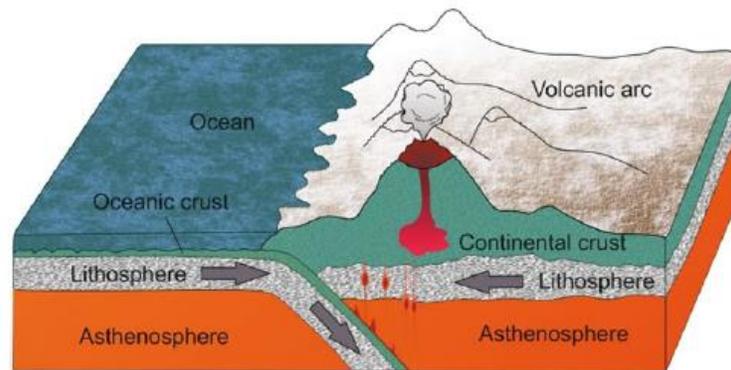


Ilustración 2: Proceso de subducción

2.1. Propiedades de los sismos

Los eventos sísmicos tienen propiedades bien estudiadas por los profesionales del área, las cuales hoy en día son parámetros importantes que se miden continuamente por equipos técnicos distribuidos en el territorio del país. Si bien la intensidad de un sismo y sus efectos dependen de un listado extenso de propiedades, las mediciones que son de mayor relevancia para los profesionales son aquellas que se miden directamente en las estaciones de monitoreo continuo. El desplazamiento, la velocidad y la aceleración, constituyen los valores medidos en función del tiempo que terminan por definir y caracterizar un sismo.

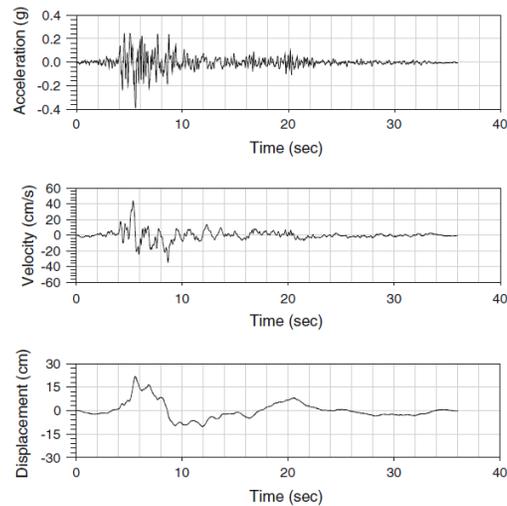


Ilustración 3: Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento

El desplazamiento provocado por un sismo es el movimiento o cambio de posición que se genera en contraste a un punto de reposo inicial (previo a la excitación). Este valor se registra continuamente cuando se produce un sismo, dando origen a un gráfico de valores del desplazamiento en función del tiempo. Según el sismo, pueden registrarse desplazamientos pequeños o de mayor envergadura, lo que significa que el suelo, específicamente en el lugar de la medición, se desplaza en menor o mayor medida al momento de llegar el conjunto de ondas sísmicas.

El registro de velocidades de un sismo es cuan rápido se produce este cambio de posición (desplazamientos). Intuitivamente, a mayor registro de velocidad, más rápido será este cambio de posición y, por el contrario, a menor velocidad, esta variación tendrá lugar de manera más lenta.

Finalmente, el registro de aceleraciones es que tan rápido se producen los cambios de velocidad. Este último registro es uno de los más importantes y el más significativo al momento de diseñar estructuras. Los sismos con acelerogramas de valores peak elevados (peak ground acceleration, *PGA* por sus siglas en inglés) están asociados a grandes liberaciones de energía, con percepciones elevadas en la población e intensidades de altos órdenes en sus respectivas escalas.



2.2. Disipadores de energía convencionales

Dentro de estos elementos se logran distinguir algunos tales como: disipadores friccionales, amortiguadores viscosos, disipadores por fluencia metálica (histeréticos o de deformación plástica) y también los disipadores viscoelásticos. Cada uno de ellos con características propias que los hacen más idóneos para los proyectos específicos donde se requieran. Se reitera que estos dispositivos nombrados presentan una amplia variedad de configuraciones y diseños comerciales. El principal problema de estos dispositivos es su elevado costo, significando un peso total en el presupuesto del proyecto no menor. Si bien su eficacia ha sido demostrada ampliamente a través de estudios de laboratorio en diversas escalas, y en la práctica real en situaciones de sismos, siguen siendo una solución costosa.

A continuación, se describen brevemente los sistemas más ampliamente utilizados, a modo de introducir sus características principales al lector:

- Disipadores friccionales: Se basan en el roce entre dos superficies con un alto coeficiente de fricción. Este roce disipa la energía transferida a la estructura.
- Amortiguadores viscosos: Basados en un sistema integrado donde un pistón interno desplaza un fluido viscoso en su interior, generando una disipación de energía debido a la resistencia al movimiento.
- Amortiguadores por fluencia: Este tipo de dispositivos descansa en una propiedad de los metales llamada fluencia. En palabras simples, la energía inducida por un sismo genera esfuerzos que el disipador toma, superando su rango de comportamiento elástico y disipando la energía en la incursión plástica del elemento.
- Disipadores viscoelásticos: Basados en la unión de láminas de elastómero vulcanizado y láminas de metal fijas en los extremos exteriores, este sistema funciona como un “sándwich” deformando las láminas internas de elastómero, disipando energía en forma de calor.

Es importante señalar que el tipo de dispositivo a utilizar es un requerimiento que debe ser estudiado para cada tipología de estructura según sus características, a continuación, y a modo resumen, se muestran dos figuras que pueden ser útiles para comprender el modo de elección.

Activados por Desplazamientos	Activados por Velocidad	Activados por Movimiento
Disipadores Metálicos	Disipadores Viscosos	Disipadores de Masa Sintonizada
Disipadores Friccionales		
Disipadores Auto centranes		

Ilustración 4: Resumen categorías de clasificación de sistemas de disipación de energía.

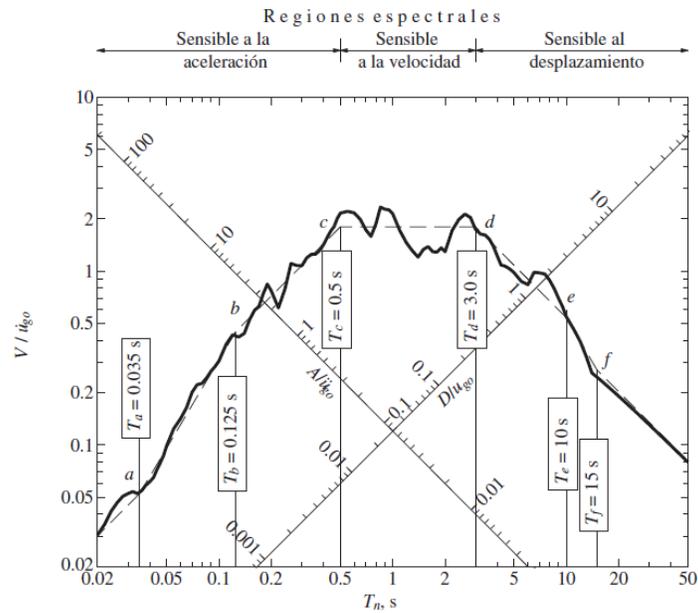


Ilustración 5: Espectro de respuesta para el movimiento del terreno de El Centro



2.3. Aislación sísmica convencional

El principio de estos dispositivos es aislar la super estructura del suelo, independizándola de los movimientos basales del terreno. Los mecanismos de funcionamiento son diversos, desde bloques elastoméricos con rigidizadores de plomo, hasta péndulos friccionales simples y dobles. El detalle de cada uno de los sistemas queda en manos del lector para su investigación profunda. Sin embargo, se reitera que estos métodos convencionales, a pesar de su elevada eficacia y remarcable estudio, el costo que significan es muy alto.

3. Diseño y construcción de mesa sísmica de bajo costo

Durante el siguiente capítulo se describirá el proceso de diseño y construcción de la mesa sísmica para la Universidad San Sebastián, indicando los criterios técnicos que se utilizaron para llevar a cabo su ejecución.

En primer lugar, se utilizan como referencia modelos de construcción cercana y/o actual con fines ligados al desarrollo de herramientas académicas, como lo son los de Morales (2017), Rives (2018), Gómez (2022) y Soto (2022). También se estudian comparaciones entre distintos mecanismos de funcionamiento, costos y efectividad según su escala para proyectos de este tipo, ligados al ámbito educacional (Tabar et al., 2018).

Los trabajos anteriormente mencionados se comparan en la siguiente tabla a modo de indicar sus características principales:

Autor (es)	Aceleración/velocidad máxima	Amplitud máxima	Carga máxima	Método de funcionamiento
Morales (2017)	No especifica	13.125 mm	3754.4 gr.	Onda senoidal.
Rives (2018)	No especifica	80 mm	No especifica	Control de pasos.
Gómez (2022)	No especifica	50 mm	12 kg.	Control de frecuencia.
Soto (2022)	Velocidad: 3.5 cm/s	150 mm	15 kg.	Control de velocidad, amplitud y distancias.
Damcı & Şekerci (2019)	Aceleración: 1.5g (a 17Hz)	75 mm	100 kg	Escalamiento de diversos registros sísmicos
Baig et al. (2024)	Aceleración: 0.8g (a 14.5Hz)	5 mm	No especifica	Escalamiento de diversos registros sísmicos

Tabla 1: Comparación de mesas sísmicas estudiadas

Se opta trabajar con modelos de baja escala como referencia siguiendo las líneas geométricas de los proyectos desarrollados en trabajos de título mencionados en el párrafo anterior, así como los trabajos de Damcı & Şekerci (2019) con la mesa SARSAR y el trabajo de Baig et al. (2024) con la *EMU Shaking Table*, en cuanto a la replicación de un registro sísmico real implementando métodos de escalamiento y reproducción.

Tras estudiar e investigar acerca de los distintos mecanismos existentes para crear mesas sísmicas y transmitir el movimiento rotacional del motor a un mecanismo lineal, se opta por el común utilizado por los autores anteriores, siendo el husillo guía (husillo – tuerca) el mecanismo adoptado para este proyecto.

Este sistema se basa en la transformación del movimiento rotacional del tornillo (husillo) a un desplazamiento lineal de la tuerca, permitiendo así el funcionamiento del sistema

mediante el uso de motores de rotación convencional, ya sean paso a paso (PaP) o servomotores.

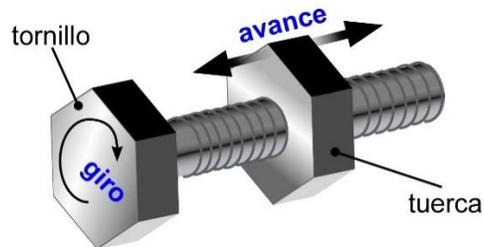


Ilustración 6: Funcionamiento del mecanismo husillo-tuerca

3.1. Componentes y organización de la mesa sísmica

La estructura principal consta de los elementos que se describen a continuación:

- 1 placa de madera para unión de materiales (60x25cm)
- 1 placa de madera MDF como base (45x30cm)
- 1 placa de madera MDF como placa deslizante (30x30cm)
- 2 barras lisas circulares como rieles ($\theta = 0,8\text{cm}$ – $L = 30\text{cm}$)
- 1 varilla rosca ($\theta = 0,8\text{cm}$ y $L = 30\text{cm}$) con tuerca trapezoidal T8
- 1 acople flexible 8-8mm
- 4 soportes SK8 para varillas lisas
- 2 rodamientos lineales SC8UU
- 2 soportes para varilla rosca KP08

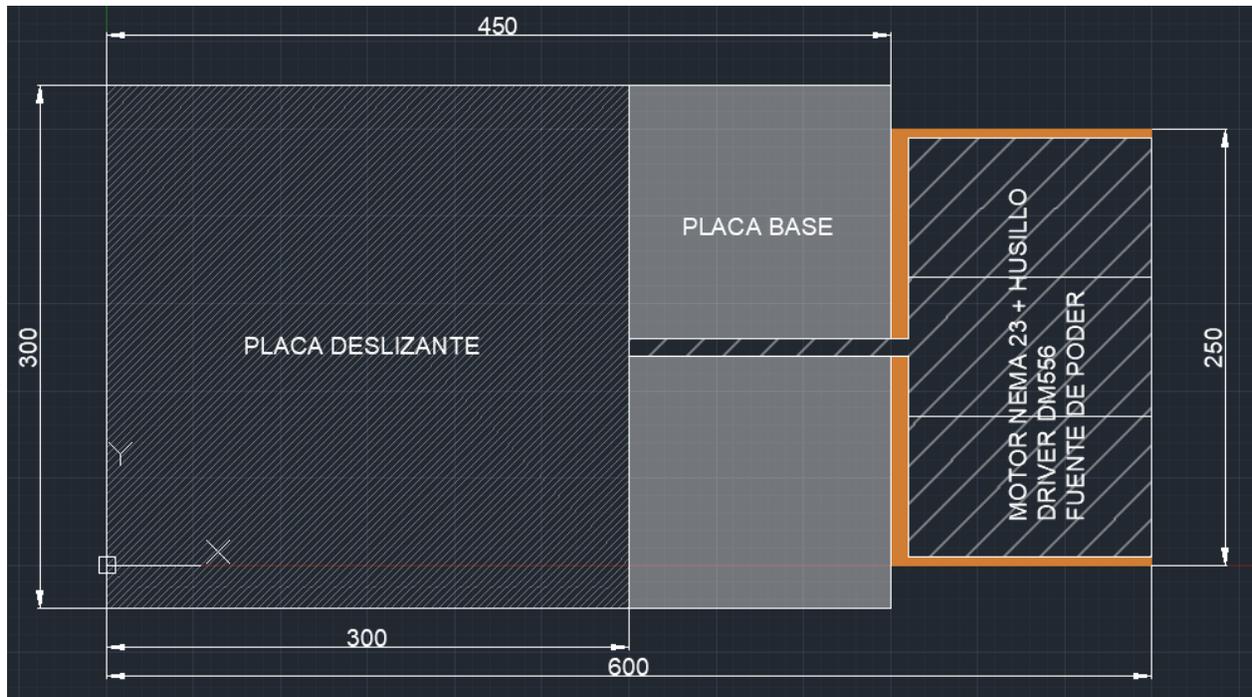


Ilustración 7: Vista en planta AutoCAD 2022 con dimensiones en mm y ubicaciones principales

La distribución de los elementos queda a criterio del diseñador, en el particular, se optó por la optimización de piezas y área de montaje, utilizando, por ejemplo, retazos de cortes para la separación en altura de algunas piezas.

3.2. Configuración del movimiento

En cuanto al movimiento de la mesa, se detallan los componentes electromecánicos que hacen posible su funcionamiento. La generación del movimiento se logra a través de un motor paso a paso (PaP) o stepper en inglés, con un torque nominal de 3.0 N-m a 3 amperios con un voltaje nominal de operación de 3.9 voltios y una resolución de giro de 1.8°/paso. El control de este motor se logra a través de su respectivo controlador compatible DM556D que ofrece una gran variedad de configuraciones para operar el motor, tanto a nivel de amperajes de operación como de pasos o micro pasos que regirán el funcionamiento y precisión del motor. Finalmente, la energía es controlada mediante

una fuente de poder de 220 voltios, con capaz de trabajar con una corriente máxima de 5 amperios y con una potencia nominal de 120 watt.

La idea principal del diseño lógico se basa en una interfaz controlada por lenguaje de programación C++ en un entorno Arduino, conocido por ser sencillo de escribir y versátil a la hora de ensamblar sus componentes lógicos. El primer prototipo de interfaz corresponde a un circuito conformado por una placa Arduino UNO compatible, una protoboard de 830 puntos, cables Dupont, un potenciómetro lineal de 10k, un display LCD con conexión a módulo I2C para simplificar la interacción entre los componentes y un botón pulsador para efectuar las comunicaciones de confirmación y ejecución de los programas.

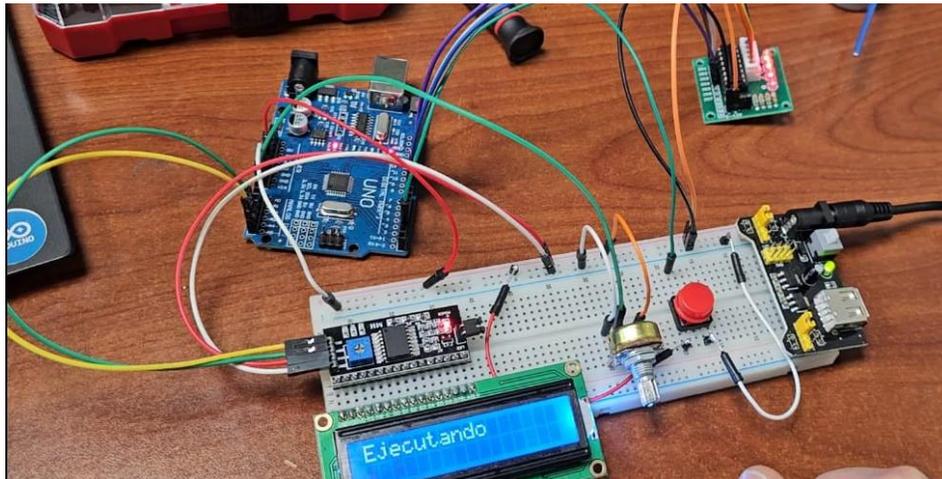


Ilustración 8: Prototipo primera interfaz

La programación del código y ensamblaje de componentes electrónicos se realiza en 3 fases. La primera consiste en un código base que permita el funcionamiento del motor de forma sencilla y cíclica con el fin de familiarizarse con el sistema de componentes y su algoritmo de ejecución, como también corroborar que las conexiones y elementos sirvan.

La segunda fase consta de la instalación de los elementos adicionales, en este caso se emplean dos finales de carrera mecánicos en los extremos de las guías para que la mesa al detectar este contacto, interprete que llegó al máximo punto de desplazamiento, pudiéndose utilizar esta referencia como un calibrador de desplazamiento o de posición inicial.



La tercera y última fase consta de la programación fina del programa, ajustándose a las necesidades específicas de este proyecto, de modo que se cumpla el objetivo de la mesa. Para esto se utilizan 3 metodologías: escritura de código propio, utilización de inteligencia artificial (IA) y referencias de códigos públicos en comunidades online. Combinando estos tres componentes se pretende generar un programa que satisfaga las necesidades del trabajo.

Tras probar diversas configuraciones, códigos, elementos y lógicas de control, el modelo definitivo consta solamente del microcontrolador Arduino UNO, 2 finales de carrera mecánicos en los extremos de las barras guía y las conexiones eléctricas entre la fuente de poder, microcontrolador y driver. La finalidad de este diseño es que sea sencillo, ocupe la menor cantidad de memoria posible en el código y se reduzca en la máxima posibilidad la interferencia entre componentes. Si bien en una primera instancia el objetivo es que el sistema sea sencillo de operar con el previo conocimiento de quien lo opera, como se describirá al final de este trabajo, parte de las líneas de mejora a futuro incluyen refinar el modelo de modo que sea más amigable para el usuario y a su vez, que permita una mayor interacción mecanismo-usuario. De momento se automatizan los procesos de manera interna en el código fuente, realizando los inputs y configuración de parámetros directamente en el código y no mediante elementos externos como los descritos en el primer prototipo.

Con estas características expuestas, se realiza la capacidad que tendrá este prototipo para servir como una herramienta práctica, teórica y difusiva para los proyectos que la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño requiera en sus diferentes aristas a futuro.

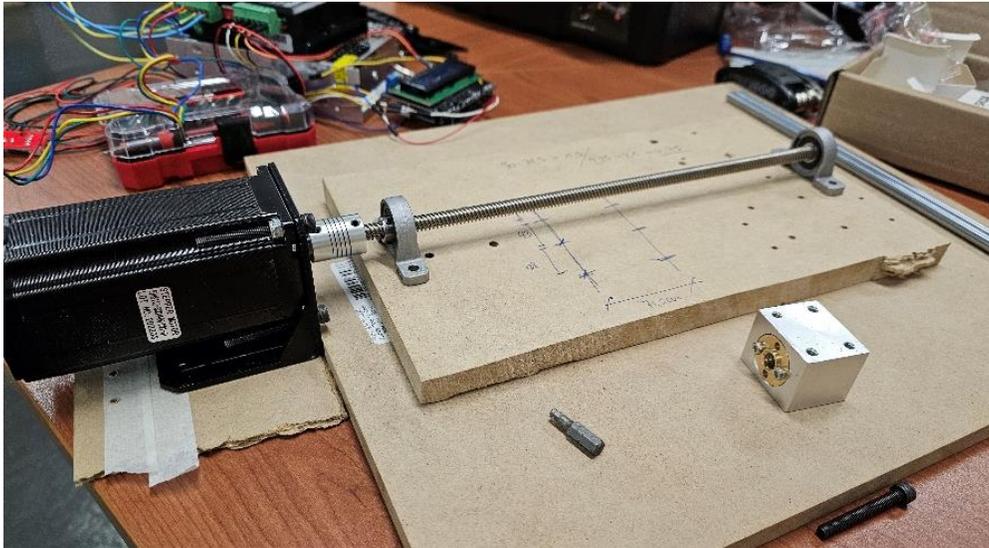


Ilustración 9: Ensamblaje motor y bases del husillo del modelo reducido

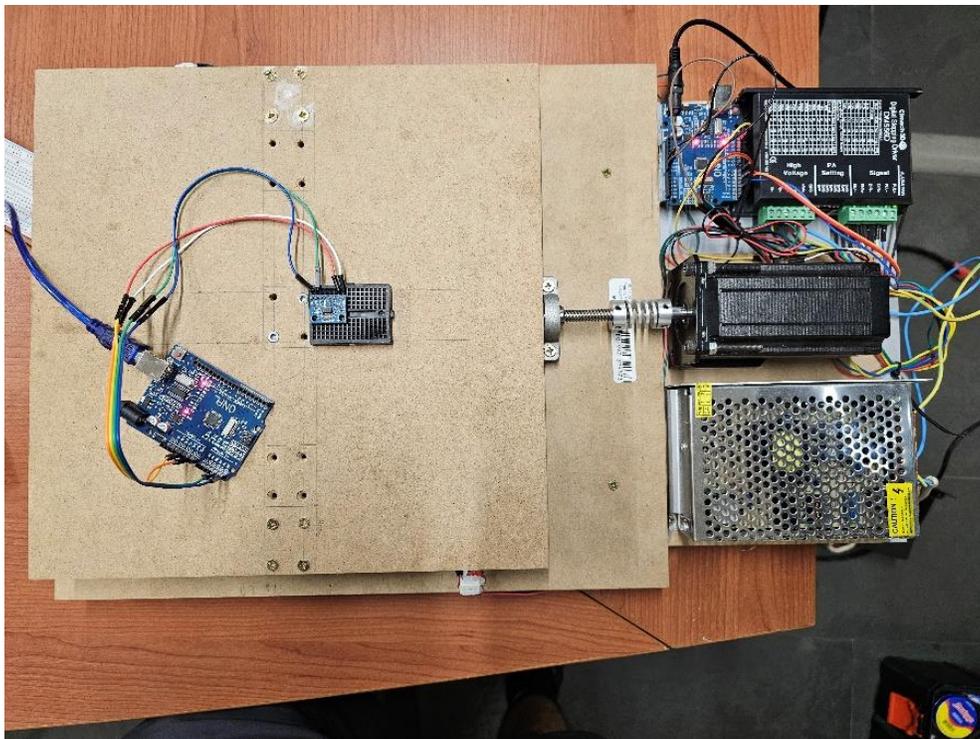


Ilustración 10: Modelo a escala reducida ensamblado completamente

En una primera instancia a modo de prueba, se define una amplitud máxima de 0.8 centímetros. Esto, según las especificaciones del husillo se puede convertir a rotaciones

en base al ángulo de paso (es decir, cuanto rota radialmente el husillo cuando al motor se le induce un pulso correspondiente a un paso). Para el caso en particular se tiene que:

$$\frac{0.8 \text{ centimetro lineal}}{1 \text{ revolución}} = \frac{1 \text{ paso}}{1.8^\circ} = \frac{1 \text{ revolución}}{200 \text{ pasos}}$$

Ecuación 1: Relación de rotaciones y desplazamientos lineales

De la relación anterior se deduce que, al limitar la amplitud a 0.8 centímetros lineales, el motor va a operar mediante medias revoluciones en cada sentido, generando un desplazamiento de 4 milímetros en sentido “adelante y atrás” desde el punto inicial y 800 pasos por revolución que pueden ser ajustados según se requiera.

De manera análoga se programa al motor para que ejecute una cantidad definida de pasos por revolución, como también una velocidad constante de operación. Variando estos parámetros se obtiene un movimiento más lento o rápido para la amplitud definida anteriormente.

```
6 // Pines del motor
7 const int stepPin = 2;
8 const int dirPin = 3;
9 const int stepsPerRevolution = 800; // Número de pasos por revolución
10 const int stepsToMove = stepsPerRevolution / 10; // Pasos para mover 1 cm
11
12 // Variables de control
13 unsigned long startTime;
14 const unsigned long duration = 15000; // Duración del movimiento en milisegundos
15 bool calibrated = true; // Asumimos que el motor está calibrado al inicio
16
17 // Velocidad rápida del motor (ajusta según lo necesites)
18 int fastSpeedMicroseconds = 270;
```

Ilustración 11: Definición de los parámetros iniciales para el control del motor (datos de ejemplo)

La estructura del código, definición de parámetros y lógica de ejecución es modificable con el tiempo, ya que lo ilustrado anteriormente corresponde al bosquejo básico empleado para el funcionamiento deseado de la mesa.

3.3. Caracterización de la mesa

Para caracterizar la mesa según las aceleraciones logradas en su base, se emplea un sensor acelerómetro ADXL345 conectado a Arduino, el que permite registrar las aceleraciones en 3 ejes según el tiempo y frecuencia que se programen.

El sensor ADXL345 del fabricante *Analog Devices*, es un dispositivo pequeño, de ultra bajo consumo energético, capaz de registrar aceleraciones en los 3 ejes cartesianos (2 horizontales contenidos en el plano del sensor y uno vertical respecto a este mismo) con una resolución de 13-bits. Este dispositivo es sumamente fácil de encontrar en tiendas locales de electrónica y áreas afines, lo que convierte a este pequeño sensor en un elemento sumamente asequible. Las características de este sensor permiten que las lecturas se calibren con una sensibilidad de ± 2 , ± 4 , ± 8 y $\pm 16g$, teniendo una mayor resolución de medida (10 bits) a medida que estos valores de sensibilidad aumenten. El mínimo valor detectable por el sensor es de 3.9 mg/LBS (0.0039g), siendo capaz también de detectar variaciones en la inclinación de menos de 1.0° .

El voltaje de operación se encuentra en un rango de entre 2V y 3.6V, lo que lo convierte en un sensor ideal para ser implementado en rutinas procesadas por microcontroladores como Arduino, Raspberry Pi o ESP32 que operan en estos rangos de voltaje.

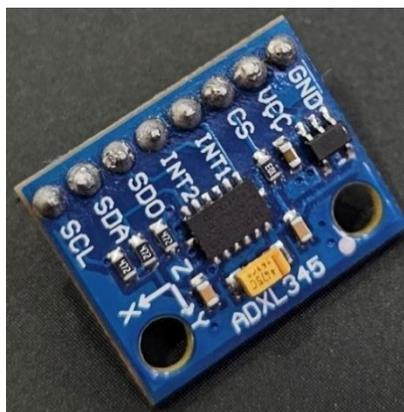


Ilustración 12: Sensor acelerómetro ADXL345

El fabricante, a través de la documentación técnica del sensor, nos ofrece todos los detalles de funcionamiento y configuración posible. Además, si se desea entrar más en detalle, se pueden ver tablas de atributos en cuanto a las mediciones, resolución, ruido generado y desviaciones en las medidas reales, todo esto para ser considerado en rutinas que requieran más precisión o un procesamiento de datos especial.

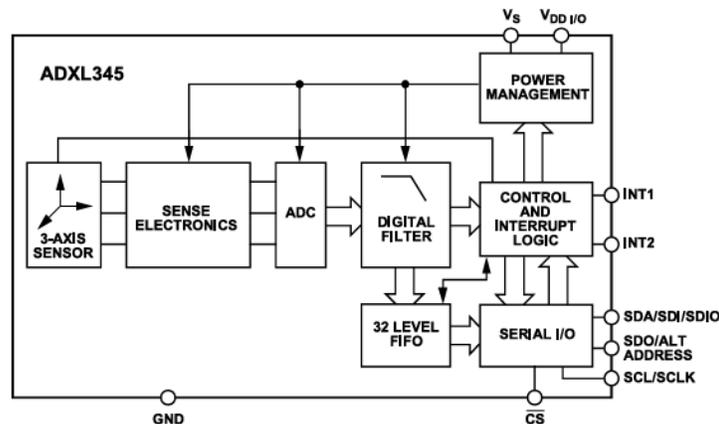


Ilustración 13: Diagrama funcional en bloque del sensor ADXL345 (Data sheet).

Para independizar los procesos de ejecución del movimiento de la mesa y de lecturas, se opta por generar un código exclusivo para la medición de aceleraciones (Baig et al., 2024). De esta manera el usuario es capaz de operar la mesa sísmica a través de la interfaz de programación mediante el código base, mientras que paralela e independientemente, se puede utilizar otro microcontrolador Arduino exclusivamente para registrar las aceleraciones de la mesa según la configuración ajustada. Lo anterior se debe a que el proceso de caracterización es independiente a la confección de la rutina de movimiento, y al separar los procesos en distintos microcontroladores, se aprovecha de mejor manera la capacidad de procesar datos de las placas.

La caracterización del movimiento se lleva a cabo en condiciones intermedias, sin carga sobre la mesa y sin operar al máximo de sus capacidades. Para esto se prueba bajo condiciones limitadas y según pruebas aisladas realizadas para determinar rangos de error:

- Amplitud máxima de 2 cm
- 400 pasos por revolución
- Velocidad de 250 pasos por revolución

Estos valores se utilizaron en base a las condiciones impuestas que generaron errores en el funcionamiento, obteniéndose así un marco de funcionamiento ideal y continuo considerando los criterios de un funcionamiento ininterrumpido y con el objetivo de comenzar la caracterización inicial de la herramienta.

Se elabora provisionalmente un código en Python que se comunica mediante el puerto serial de Arduino IDE para obtener los valores de aceleraciones y graficarlos en los 3 ejes cartesianos. Este código, se modificará a lo largo de todo el trabajo según los requerimientos que el momento exija, siendo esta rutina un proceso necesario a lo largo del proyecto para caracterizar los movimientos, pero a su vez marginal en cuanto a que sea un código fijo no modificable.

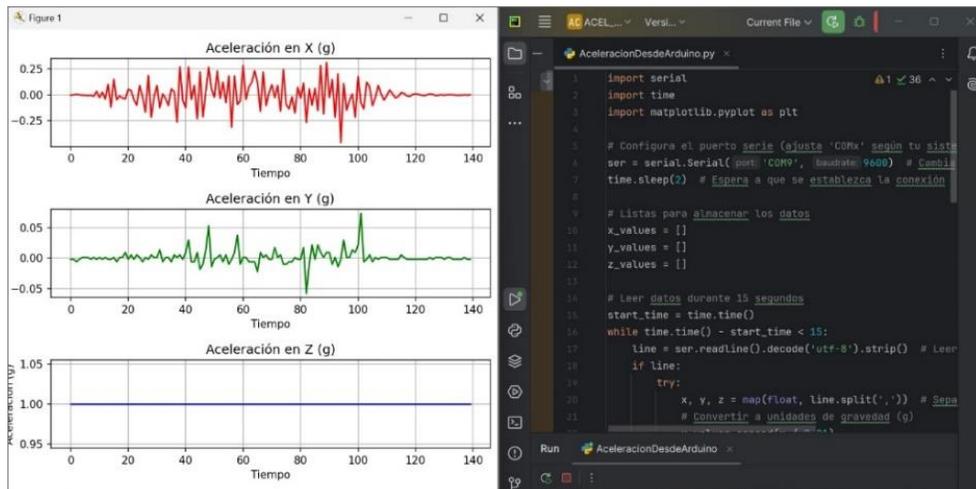


Ilustración 14: Salida código Python con gráficos de aceleraciones

Adicionalmente, se realiza una prueba inicial donde se busca adaptar la sensibilidad de lectura del sensor y visualmente corroborar que el registro de aceleraciones que se obtenga tenga concordancia con lo esperado. Además, esta primera prueba, al igual que todas las siguientes relacionadas a la calibración y entendimiento del sistema, arrojan

observaciones que para efectos de este estudio deben ser consideradas para posteriormente ser tomadas en cuenta al momento de analizar los datos.

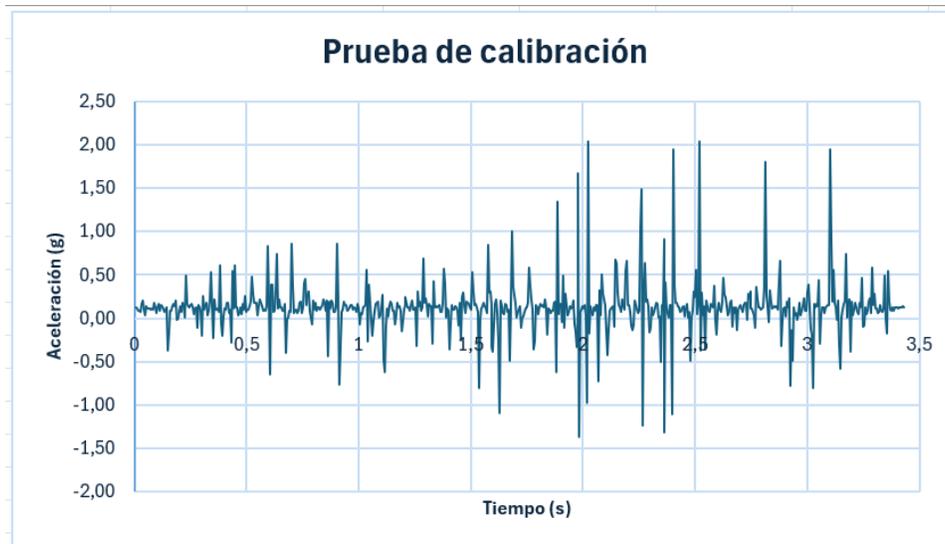


Ilustración 15: Acelerograma de primera prueba de calibración

De esta calibración se observa que el registro es consistente en forma y valores con lo esperado para la prueba, donde primeramente no es importante la magnitud de valores o su análisis cuantitativo, ya que lo que se busca es verificar que la herramienta sea capaz de generar un movimiento que pueda validarse y trabajarse para afinar el estudio.

Otro aspecto importante que se observa de las pruebas de calibración es que se inducen peaks de aceleración en el acelerograma que no debiesen ser inducidos por la rutina que genera el movimiento, se revisa el código empleando incluso a modo de prueba un input de onda senoidal para descartar errores de la transmisión de movimiento. Finalmente, se verifica que, los peak son generados por el cambio de sentido en el giro del motor. Al ser un motor paso a paso, la variación del sentido de giro se produce por la inducción de corriente en las bobinas (2 pares), siendo este prácticamente instantáneo.

Es por esto por lo que, tras realizar pruebas con distintos valores de movimiento, se filtran los datos eliminando aquellos que se identifican con valores superiores a 1g de aceleración. Es posible hacer esto ya que, dentro del proceso de calibración, se utilizó el monitor serial para ver el acelerograma en tiempo real, quedando claramente



identificados los peak de cambio de dirección en este registro. Este criterio de limpiar los valores por sobre 1g es holgado, ya que los valores obtenidos por sobre este límite son los cambios de dirección más notorios, quedando dentro del registro final valores que pudiesen ser superiores a los esperados en las pruebas, pero se admiten como parte del margen que estas pruebas conllevan.

4. Proceso de replicación de un sismo real: Sismo 8.8 Mw – 27F

El apartado más interesante de analizar en el trabajo relacionado a la construcción y programación de la mesa sísmica es replicar un registro sísmico real que vaya a ser ejecutado por esta herramienta, adecuado a la escala de trabajo actual. Para ello es necesario describir el proceso mediante el cual se obtienen los valores a utilizar para dicho funcionamiento.

En febrero del año 2010, tuvo lugar un sismo con una magnitud de momento igual a 8.8 en la escala Richter con epicentro cercano a la costa de Constitución, en la región del Bío Bío (Ministerio de Educación, n.d.). Este evento se presenta en un contexto donde Chile se encuentra reconocidamente posicionado por su desarrollada ingeniería sismo resistente y su red de monitoreo contundentemente reforzada y validada a lo largo del territorio nacional.

Dicho lo anterior, se extraen los datos de las lecturas corregidas de la estación Constitución, monitoreada por el Centro Sismológico Nacional (CSN), entidad que dispone de estos registros abiertamente al público a través de la red de cobertura nacional de acelerógrafos del departamento de ingeniería civil de la Universidad de Chile (RENADIC). Los datos son ordenados en tres archivos de extensión “.txt”, donde se almacenan las aceleraciones, velocidades y desplazamientos directamente entregados por el archivo base.

A modo de corroborar los datos, se utilizan 2 métodos alternativos para cruzar información y analizar qué tan fidedignos se muestran los datos. En primera instancia se utiliza el software *Seismo Signal*, donde se carga el archivo que contiene las aceleraciones

ordenadas en una sola columna, ingresando además el paso de tiempo de las mediciones (dt) y las unidades nativas del archivo base, en este caso cm/s^2 para las aceleraciones, cm/s para las velocidades y cm para los desplazamientos.

El software proporciona tres gráficas, correspondientes a la aceleración, velocidad y desplazamientos en función del tiempo que duró el sismo registrado. La versión de prueba y académica solo permite visualizar estas salidas y otras más para análisis de frecuencias, periodos, entre otras, pero no permite corregir las lecturas.

El segundo método utilizado para corroborar los datos corresponde al procesamiento mediante Matlab, donde se elabora un código que sigue el siguiente esquema:

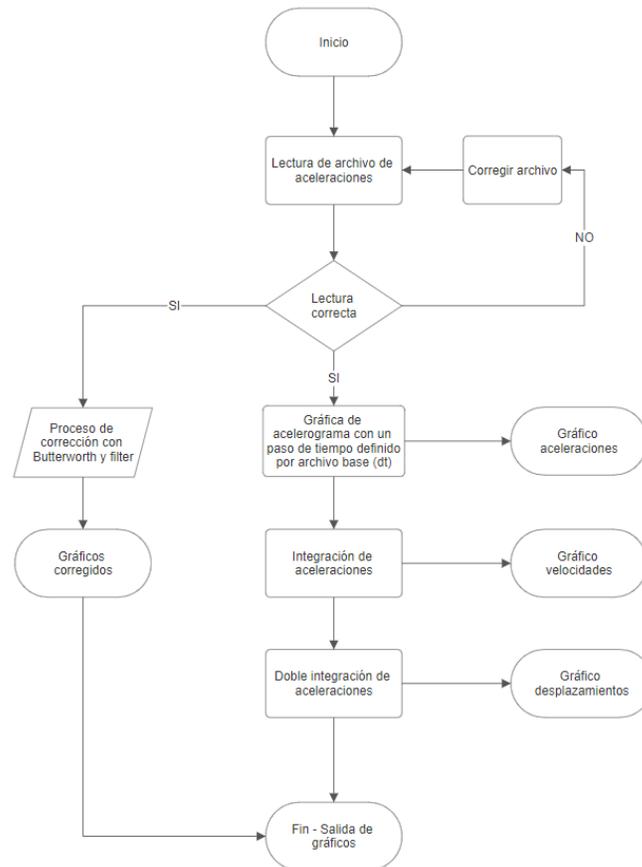


Ilustración 16: Diagrama lógico de proceso en Matlab

La salida del programa nos entrega una figura con las 3 graficas (aceleración, velocidad y desplazamiento) en sus estados originales (azul) y corregidos (naranja).

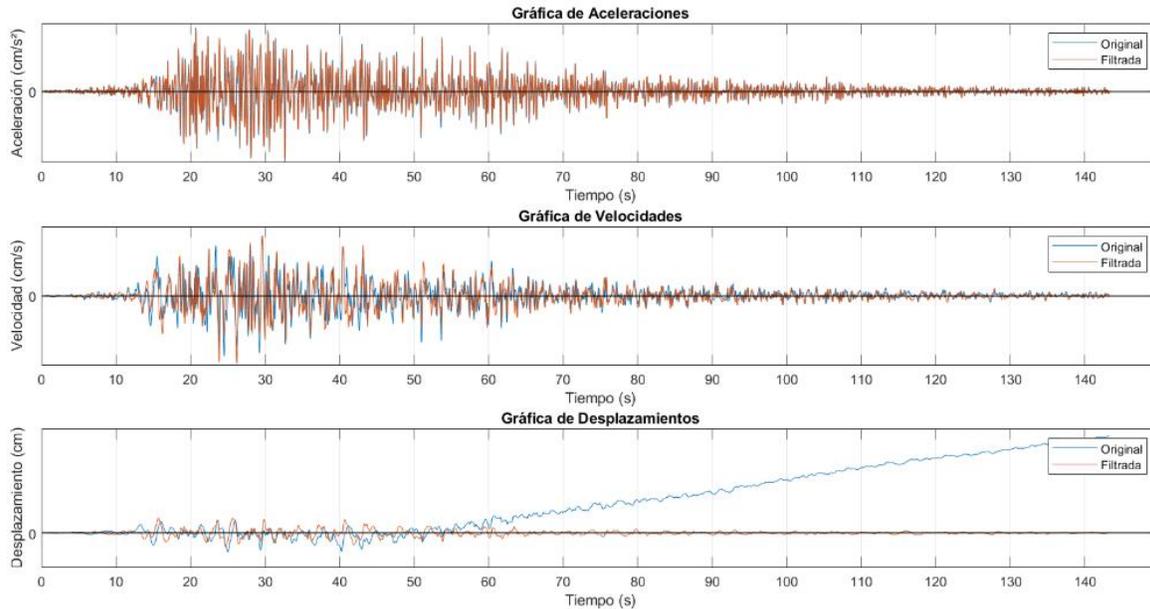


Ilustración 17: Gráficos de las 3 componentes del sismo 8.8Mw 27F, Chile. Gráfico original y corregido.

La corrección de estos datos hace referencia a las variaciones que interfieren en los valores teóricamente esperados o inducen valores anómalos en los registros. Esto se debe a múltiples factores, tales como la calibración de los equipos medidores, fenómenos naturales o artificiales y el propio procesamiento de los datos, ya que, al utilizar métodos matemáticos para obtener los valores, en el caso presente se requiere una doble integración de valores, lo que deja al aire una constante numérica que al procesarla amplifica su valor, correspondiendo este a un error asociado en el registro sin corregir. El código en Matlab utiliza la corrección por línea base, implementando una corrección por *Butterworth* y luego por *filter*, ambas son rutinas que se pueden implementar mediante el uso de *add-ons* desde el mismo software.

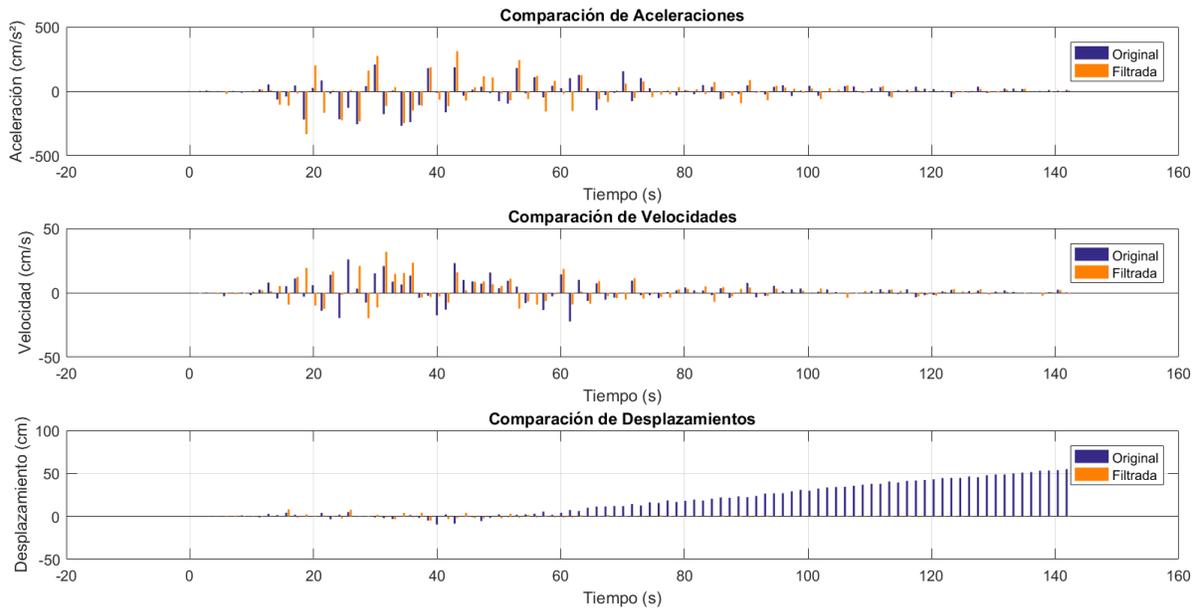


Ilustración 18: Diferencias entre valores originales y de corrección.

4.1. Análisis y manejo de datos para el proceso de replicación

El proceso de replicación viene dado por aspectos dimensionales del problema. Claramente una mesa con fines de simulación, de cualquier índole, no es capaz de replicar los valores de magnitud de un sismo en la escala de desplazamientos en que se desarrolla un evento real. El objetivo es lograr replicar las aceleraciones del registro sísmico en un entorno controlado por los desplazamientos de la mesa como la principal limitante espacial.

Los trabajos de Damcı & Şekerci (2019) con la mesa SARSAR y Baig et al. (2024) con el proyecto EMU (Eastern Mediterranean University) Shaking Table, realizan este procedimiento debido a la necesidad de generar simulaciones que se apeguen con mayor firmeza a lo que es la replicación de un evento sísmico en cuanto a sus componentes de aceleración. Estos autores en sus respectivos proyectos realizan rutinas y análisis de gran complejidad, siendo necesario adaptar los procesos para obtener resultados en menor tiempo y con una mayor facilidad, por ende, se utilizan como referencias para crear una rutina que se adapte al presente estudio.



Un aspecto importante por considerar en este proyecto es la cantidad de memoria que posee la placa Arduino UNO. En el trabajo realizado por Baig et al. (2024) se menciona como una vía de mejora, la implementación de un microcontrolador con mayor capacidad de memoria para simular sismos con un paso de tiempo menor. En el presente caso, el registro de aceleraciones del terremoto del 27 de febrero del 2010 posee una duración aproximada de 150 segundos con un paso de tiempo (Δt) de 0.005 segundos, obteniéndose así cerca de 30000 datos que procesar, frente a las simulaciones de entre 10 y 12 segundos con un paso de tiempo de 0.01 segundos que la mesa EMU logró simular con el procesamiento de datos mediante la placa Arduino UNO.

Los autores antes mencionados señalan la metodología empleada para replicar los sismos de Kobe, Northridge y Friuli. A continuación, se describen los pasos:

- i. Obtención de los datos del sismo y escalamiento correspondiente en base a la amplitud máxima permisible por la mesa.
- ii. Determinar las aceleraciones y velocidades máximas que el motor a emplear es capaz de reproducir.
- iii. Determinar la mínima cantidad de pasos que se le puede suministrar al motor para ejecutar los movimientos escalados.
- iv. Establecer un rango de operación menor al escalado, para asegurar que la mesa opere dentro de sus límites si excederlos.
- v. Conversión de los desplazamientos del sismo escalado de cm a pasos.
- vi. Conversión de las velocidades del sismo escalado de $\frac{cm}{s}$ a $\frac{pasos}{s}$.
- vii. Conversión de las aceleraciones del sismo escalado de $\frac{cm}{s^2}$ a $\frac{pasos}{s^2}$.

Los pasos siguientes corresponden al traspaso de información hacia el Arduino UNO y la implementación de un sensor MPU6050, similar al ADXL345 descrito en el subcapítulo 3.4 y el cálculo del error medio cuadrático como validación de hipótesis entre las medidas reales y las simuladas.

4.2. Fase de control con Arduino UNO – motor NEMA 23

El microcontrolador empleado para realizar la labor de procesamiento se pone a prueba al momento de incluir la función que permita replicar los valores recopilados por medio del motor NEMA 23. Se probaron dos métodos para la comunicación entre la placa Arduino y los datos a simular.

En primera instancia se recurrió al lenguaje de programación Python que, por medio de un script diseñado para este caso, recopila los datos de desplazamientos de uno de los archivos .txt y los transmite al terminal serial.

```
1 import serial
2 import time
3
4 # Configura el puerto de Arduino y la velocidad de comunicación
5 arduino_port = 'COM4'
6 baud_rate = 9600
7
8 ser = serial.Serial(arduino_port, baud_rate)
9
10 desplazamientos_file = 'DESPLAZAMIENTO_MM_ESCALA' # Nombre del archivo con los desplazamientos
11
12 # Función para leer el archivo de desplazamientos
13 usage
14 def leer_desplazamientos():
15     with open("DESPLAZAMIENTO_MM_ESCALA", 'r') as file:
16         # Lee las líneas del archivo
17         desplazamientos = [float(line.strip()) for line in file.readlines()]
18     return desplazamientos
19
20 # Función para enviar desplazamientos al Arduino
21 usage
22 def enviar_desplazamiento(desplazamientos):
23     for desplazamiento in desplazamientos:
24         # Envía el desplazamiento a Arduino
25         ser.write(f"{desplazamiento}\n".encode())
26         print(f"Enviando desplazamiento: {desplazamiento} mm")
27         time.sleep(0.005) # Evita sobrecargar el puerto serial
28
29 desplazamientos = leer_desplazamientos()
30 enviar_desplazamiento(desplazamientos)
31 ser.close()
```

Ilustración 19: Código en Python para la comunicación serial entre el script y Arduino.



Seguidamente se adapta uno de los códigos en Arduino para realizar las siguientes funciones:

- Comunicación mediante el puerto serial de Python
- Lectura de los datos del puerto serial
- Ejecución de las funciones en el código (mover el motor según los desplazamientos leídos desde el comunicador serial)

Esta opción es rápidamente descartada, debido al tiempo que le toma al script procesar los datos de desplazamientos obtenidos, sumándole a esto que, posterior a esta lectura, el código en Arduino debe integrarlos al código base. Esto generó que en la mayoría de las pruebas el motor simplemente no funcionara, tanto por la imposibilidad de establecerse la conexión entre el Arduino y el monitor serial de Python, como por la disminuida capacidad de la placa para procesar tantos datos con la fluidez necesaria.

La segunda opción fue crear un *array* con los datos de desplazamientos escalados e incorporarlos directamente en el código de Arduino, haciendo que el proceso se unifique y dependa netamente del procesamiento de datos por el código base en el microcontrolador.

Aquí es donde se nota la principal desventaja descrita por Baig et al. al implementar un microcontrolador Arduino UNO en este tipo de proyectos. La memoria que posee esta placa para procesar información es de 16MHz, siendo suficiente para la mayoría de los proyectos que se efectuarían con este tipo de microcontrolador, pero no sirviendo para la replicación de fenómenos que requiera procesar una gran cantidad de datos.

La placa no logró soportar el almacenamiento de los datos cargados en forma de *array*, comenzando entonces a optar por acortar el intervalo de datos que se van a utilizar. En base a un segundo registro sísmico obtenido para el terremoto del 27 de febrero del 2010 (Castro et al., 2022) mediante SIBER-RISK (*Simulation Based Earthquake Risk and Resilience of Interdependent Systems and Networks*) se cruza la información para determinar la instancia precisa a la que se debiese recurrir para la simulación del sismo.

De esta manera se decidió por analizar la sección del registro comprendida por los 15 segundos más significativos del movimiento fuerte en el registro, adoptando el periodo de lectura entre los 20 y 35 segundos (aproximadamente) del registro completo.

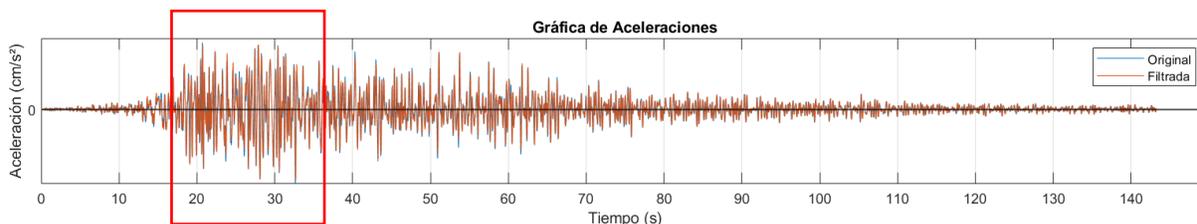


Ilustración 20: Aceleraciones del sismo 27F, lectura total y marca en el intervalo seleccionado

Además, se recurrió al uso directo de los desplazamientos obtenidos mediante el registro base de Constitución, realizando una serie de operaciones para llegar al movimiento final del motor paso a paso que se describirá más adelante como el proceso adoptado en este estudio para la replicación del movimiento. A partir de la lista de valores correspondientes a los desplazamientos medidos durante el sismo del 27F, se seleccionaron aquellos que se encuentran en el rango de los 20 a 35 segundos del movimiento fuerte adoptado para este estudio, donde posteriormente se identifica el mayor valor de desplazamiento en este periodo y se divide por la amplitud máxima de la mesa a escala. Esto se realiza para obtener un factor de reducción que se incorporará en el registro original a modo de escalar estos desplazamientos y que no superen en magnitud los valores máximos admitidos por la mesa.

MAX abs cm	9,76	cm
MAX abs mm	97,6	mm
A mesa	50	mm
R	2,0	adim.

Ilustración 21: Valores para calcular R

Una vez obtenido el valor de R, se procede a dividir el registro de desplazamientos por este valor, obteniéndose un vector de desplazamientos escalados en milímetros. Seguido a esto y en base a la información técnica de los componentes, se sabe que el



desplazamiento lineal de la tuerca acoplada al husillo es de 8 milímetros por revolución, pudiendo de esta manera dividir nuestro nuevo vector de desplazamientos escalados entre 8 mm, quedando así un vector de desplazamientos en términos de revoluciones del motor y con el signo que corresponda haciendo referencia al sentido de giro (horario o antihorario).

Desplazamientos (mm)	Desplazamientos (mm) + R	rev
0	0	1
-75,19	-47,22396684	-6
-13,88	-8,717497802	-1
57,85	36,3333752	5
12,34	7,750282628	1
-13,65	-8,573043587	-1
20,24	12,71197086	2

Ilustración 22: Transformación de datos en base a revoluciones

Finalmente, tras operar con esta metodología, se logra crear un array con los valores de revoluciones escalados que es soportado por el microcontrolador sin inconvenientes, dejando como resultado una operación sencilla del motor que posteriormente es ajustada directamente con los parámetros de movimiento asociados al número de pasos y velocidad de giro del motor que calibran de cierto modo la resolución del movimiento.

Luego de hacer actuar y validar esta funcionalidad, se opta por avanzar hacia un movimiento más detallado de la mesa, por lo que, en vez de generar un vector de movimiento en base a revoluciones, se genera uno en base a pasos del motor, debido a que la primera opción considera revoluciones completas que como se verá a continuación, hace que el motor pierda resolución al definirse por medio de revoluciones enteras sin posibilidad de llegar a puntos medios. Como se muestra en la ecuación 1 del capítulo 3.3, se sabe que el hilo que desplaza la tuerca genera un movimiento lineal de 0.8 cm por cada revolución, y también según la ficha técnica del motor NEMA 23, este completa una revolución con 200 pasos (por defecto).

Dicho esto, es posible generar un vector de movimiento en base a pasos, realizando la conversión de desplazamientos según el registro sísmico a pasos, mediante la



multiplicación del valor de revoluciones calculado por los 200 pasos equivalentes a una revolución en la configuración por defecto. Para realizar este proceso, al momento de calcular las revoluciones para los desplazamientos requeridos, se emplean 4 decimales en vez de redondear el número al entero más próximo como en el primer caso.

Desplazamientos (mm) + R	rev	Pasos
0	1	
-23,61198342	-2,9515	-590
-4,358748901	-0,5448	-109
18,1666876	2,2708	454
3,875141314	0,4844	97
-4,286521794	-0,5358	-107
6,355985429	0,7945	159

Ilustración 23: Transformación de datos en base a pasos

De esta manera, el vector que resulta de esta conversión es capaz de definir los movimientos de manera más detallada al regirse por los pasos que requiere dar. En otras palabras, la resolución de este método es 200 veces más precisa que la que ofrecía el movimiento por revoluciones (ver ecuación 1).

El vector puede extenderse o acortarse según sea requerido por el usuario, mientras que la memoria del microcontrolador no sea superada. Esta metodología resulta ser beneficiosa porque no requiere procesar datos a través de la comunicación serial con otro programa, ya que la misma placa Arduino procesa los datos inmediatamente de forma interna.

4.3. Modelo final funcional

Finalmente, el modelo utilizado corresponde a la integración de la estructura de MDF como base y placa móvil, en conjunto al sistema de movimiento compuesto por el motor NEMA 23 con su fuente de poder y controlador DM556. El código utilizado corresponde a la replicación de desplazamientos escalados en base a una sección extraída del registro de aceleraciones corregido para un intervalo de tiempo de entre 10 y 15 segundos,



correspondientes al espectro de movimiento fuerte captado por la estación de monitoreo en Constitución.

El modelo tiene la ventaja de poder ser trasladado según se requiera, debido a sus dimensiones y peso, pero al momento de ser utilizado debe ser asegurado a su base y preferentemente utilizar un elemento de soporte que actúe como masa de reacción para no inducir efectos dinámicos sobre las muestras al momento de operar.

El montaje final no incluye accesorios externos como pantallas LCD, potenciómetros o botones debido a que su incorporación para los efectos esperados durante la fase de pruebas solo significa el uso de memoria y menor capacidad para procesar el vector de movimiento que se ingrese. Por ende, el proceso es automático desde que el microcontrolador recibe 5 voltios y consta de la calibración automática de la mesa y el funcionamiento inmediato de ésta mediante la replicación del sismo.

Todo este conjunto se monta sobre una placa adicional de melamina que agrega peso a la base y sirve para la fijación de los elementos eléctricos en una sola pieza. Para que el sistema funcione se requiere conectar la placa Arduino UNO a 3.3 o 5 voltios y la fuente de poder a la red de corriente domiciliaria convencional. Durante el proceso de ensayos se optó por conectar el Arduino UNO al computador como fuente de poder debido a que de esta manera las modificaciones se hacen en el momento y facilita la operación de la mesa, versus implementar un *switch down* para crear una sola conexión eléctrica entre la red de 220 voltios y los componentes eléctricos.

5. Teoría de fenómenos de interacción y aislación sísmica geotécnica

En este apartado se desarrollan los conceptos asociados a 2 fenómenos estudiados en la actualidad relacionados a la dinámica de estructuras e ingeniería geotécnica, como lo son la interacción estructura-suelo (SSI) y la interacción estructura-suelo-estructura (SSSI) se deja este apartado planteado como motivación para futuras pruebas a realizarse mediante el uso de las herramientas desarrolladas durante el transcurso del trabajo.



Estos estudios son una clave fundamental para la correcta comprensión de fenómenos dinámicos en estructuras, principalmente a la hora de verse sometidas a cargas sísmicas. Los estudios experimentales resultan ser complejos debido a las escalas de magnitud en que se deben aplicar. Por otra parte, los estudios a escala reducida son escasos, principalmente debido a la falta de herramientas para su evaluación.

A grandes rasgos, los procesos de interacción se pueden describir como un trabajo en conjunto entre las estructuras, sus fundaciones y los suelos donde se emplazan, resultando en respuestas dinámicas que pueden ser de amplitud o de disminución del comportamiento estructural.

Los estudios de interacción corresponden a la incorporación de los efectos que induce el suelo a las estructuras dentro del análisis dinámico, y como esto afecta a la respuesta de éstas. También es aplicable en el sentido contrario, en otras palabras, como la respuesta dinámica de las estructuras afecta la respuesta del suelo (Abdulaziz et al., 2023).

La interacción de tipo SSI es el estudio del comportamiento dinámico de una estructura al incluir los efectos del suelo y viceversa (como la estructura afecta al suelo), de manera aislada, es decir, solamente la estructura en cuestión y su entorno. Por otro lado, la interacción del tipo SSSI se refiere a como la respuesta dinámica de las estructuras afecta a las colindantes mediante un puente de conexión, el suelo (Naserkhaki & Pourmohammad, 2012).

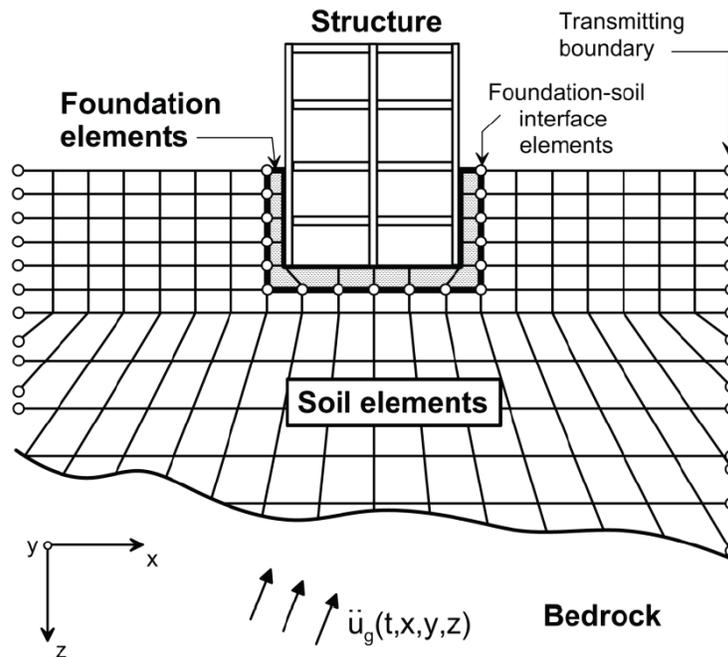


Ilustración 24: Ilustración esquemática de un análisis directo de la interacción suelo-estructura en un medio continuo por medio de elementos finitos (NEHRP, 2012).

El común de los modelos estructurales analizados corresponde a la estructura en sí a la cual se le aplican las cargas correspondientes. Para esto se consideran las condiciones de borde típicamente utilizadas en los programas de análisis estructural, donde el suelo pasa a un segundo plano en los análisis dinámicos, empleándose netamente para los cálculos asociados a las fundaciones. En los casos de estudio donde se analizan los fenómenos de interacción, se modela el suelo o una representación de él, considerándose como un elemento que aporta a la respuesta dinámica de la estructura.

Si se toma en cuenta un modelo matemático idealizado, es útil considerar el suelo como un resorte entre ambas estructuras (para el caso del análisis entre 2 estructuras), o $n-1$ resortes para n estructuras según el análisis. Cada resorte tendrá propiedades distintas, según el tipo de suelo, la estratigrafía de éste, velocidades de propagación de ondas, etc. La mejor aproximación se puede realizar al utilizar dos resortes lineales y uno rotacional (k_v, k_h, k_θ) que representen las elasticidades verticales, horizontales y rotacionales ligadas al suelo (Razzouk et al., 2023).

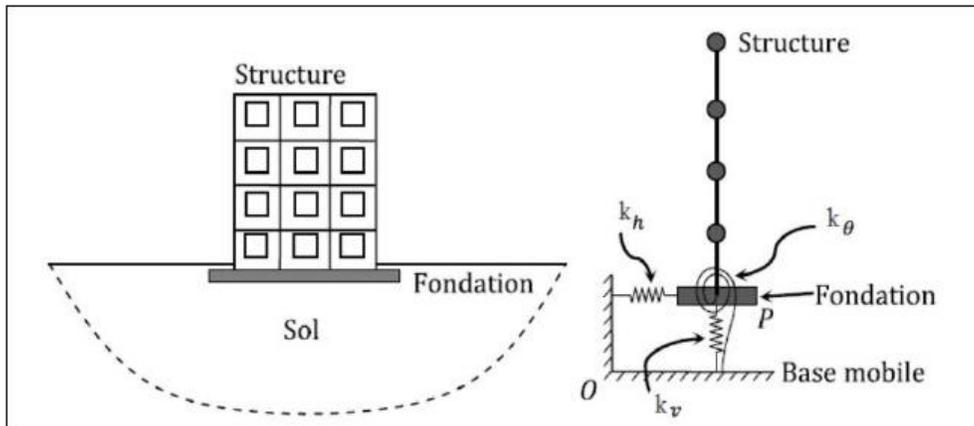


Ilustración 25: Modelo representativo para el análisis de la interacción estructura-suelo

Recientemente los estudios relacionados a la interacción estructura-suelo-estructura ha tenido un impulso significativo, donde autores como Gueguen (2000) y Trombetta et al. (2014) han propuesto experimentos para analizar los efectos de estas interacciones dinámicas, dando cuentas de la importancia de considerar esta realidad en el campo de la ingeniería civil al evidenciar que los efectos producidos por la interacción si tiene implicancias en las respuestas de los medios y de las estructuras.

No obstante, estos efectos pueden ser beneficiosos para las estructuras, llegando a plantearse ideas como la implementación de elementos rígidos en el suelo a modo de disipar energía sísmica por medio de la perturbación que se crea en el campo de aplicación y modificar la respuesta dinámica de estructuras críticas de manera indirecta (Vicencio et al., 2023) .

La interacción estructura-suelo-estructura es algo más compleja de analizar, debido a que la respuesta del suelo y de la estructura 1, depende del comportamiento de la estructura 2, 3 y así, tal como estas estructuras dependerán de las otras y del comportamiento ya afectado del suelo. Sin embargo, estos fenómenos tienen la característica de generar cambios en la respuesta del entorno donde se emplazan las estructuras, obteniéndose la posibilidad de utilizar estas perturbaciones como factor de protección estructural ante eventos sísmicos (Vicencio & Alexander, 2024).

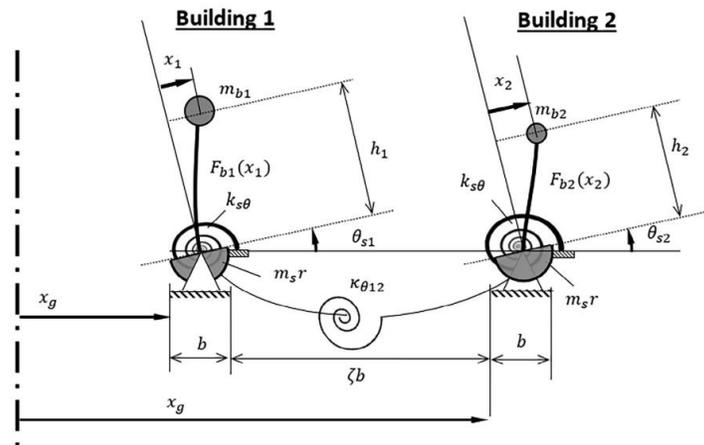


Ilustración 26: Modelo idealizado del mecanismo de interacción entre 2 estructuras adyacentes

Estos efectos continúan siendo investigados debido a su necesidad de comprensión en general, y particularmente en el entorno de ciudades densamente pobladas, como lo es Santiago de Chile (Vicencio & Alexander, 2024), (Vicencio et al., 2024). Considerando la actividad sísmica que caracteriza nuestro territorio y la tendencia a la construcción vertical de edificaciones que alberguen a cientos de familias en espacios cada vez más reducido, incluyendo el factor de protección sísmica que establece la Norma Chilena, se pueden obtener resultados beneficiosos de estos análisis para afectar positivamente el impacto económico, de eficacia y seguridad de la protección sísmica como hoy en día se plantea.

5.1. Aislación sísmica geotécnica

Los sistemas de aislación sísmica, como los descritos en el capítulo 2.3, constan de una interfaz flexible o deslizante, ubicada en puntos estratégicos entre las fundaciones y la estructura. Su propósito es desacoplar los movimientos del suelo y la base de la superestructura, actuando como un filtro de ondas sísmicas (Taylor & Igusa, 2004). La principal filosofía de diseño de estos elementos data de la baja rigidez lateral que tienen estas interfaces, permitiendo que verticalmente las cargas se transmitan sin problemas desde la estructura hacia las fundaciones, pero, que las cargas de corte inducidas por el sismo actúen en el mecanismo empleado, transmitiendo un mínimo de energía hacia la construcción. En el documento Protección Sísmica de Estructuras Cámara Chilena de la

Construcción & Corporación de Desarrollo Tecnológico (2011), se exponen los principales costos vs. beneficios que conlleva la implementación de estos sistemas convencionales.

En los últimos años, los sistemas de aislación sísmica no convencional han llevado esta interfaz de desacople a ubicarse directamente en el suelo, y en ocasiones, empleando directamente sedimentos geológicos, por ende, el mecanismo está directamente relacionado con la aplicación geotécnica de los materiales (H. H. Tsang, 2009).

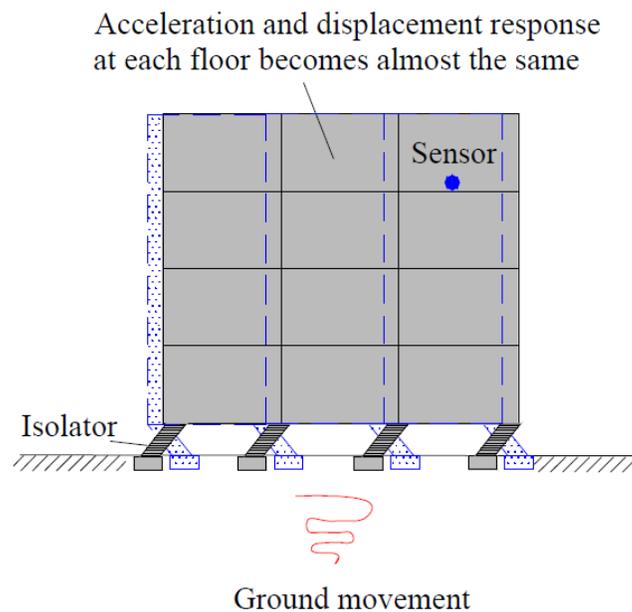


Ilustración 27: Descripción esquemática de un sistema de aislación sísmica

Existen diversas investigaciones según el tipo de aislación a emplear, siendo las más abiertamente estudiadas aquellas compuestas de mezclas de arena-caucho (sand-rubber mix) debido a la amplia disponibilidad de caucho generado como desecho de la industria y su excelente desempeño en las pruebas realizadas, así como las atribuciones que rescata de diferentes estudios recopilados (Pistolas et al., 2018), (Dhanya, 2023).

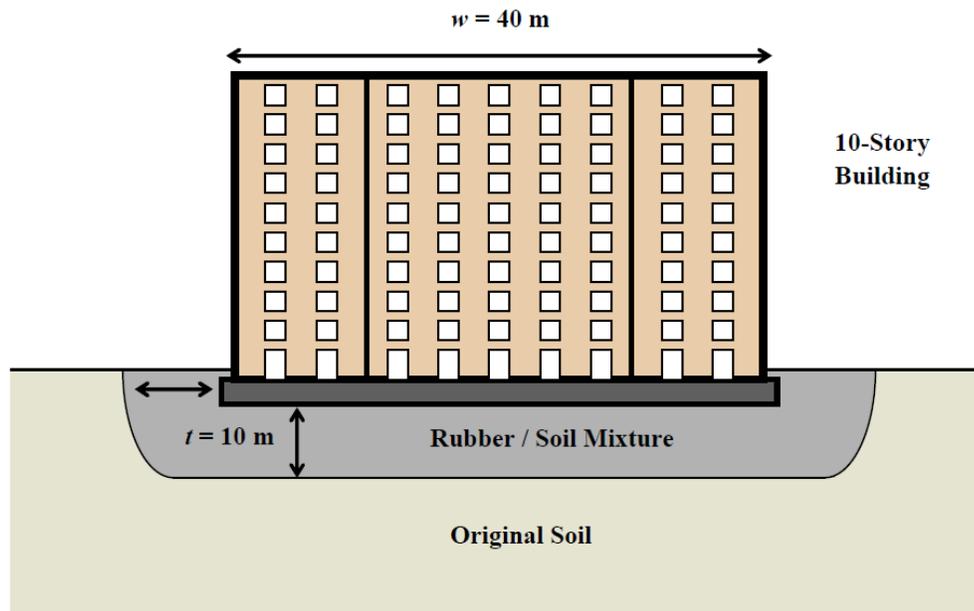


Ilustración 28: Esquema propuesto por Tsang (2008) para la aplicación de RSM

Autores como (H.H. Tsang, 2009), (H.H. Tsang & Pitilakis, 2019) y (Dhanya et al., 2020) han estudiado esta alternativa de aislación poniendo énfasis en sus capacidades de implementación en países en vías de desarrollo, estructuras de mediana envergadura y la efectividad que estos métodos ofrecen en virtud de los porcentajes contenidos en las mezclas (Pitilakis et al., 2021) (o relaciones de caucho) y la disposición de esta en el modelo constructivo (Vratsikidis & Pitilakis, 2023). Los resultados sitúan esta metodología no convencional como una opción sostenible y eficaz, obteniendo porcentajes de amortiguación vertical y horizontal comparables a los demostrados por los sistemas de aislación basal convencional. Si bien los resultados generales dependen principalmente de las condiciones de entrada de datos, configuración de los esquemas y modelos, la evidencia actual es suficiente para que se siga investigando y realizando pruebas que ahonden en la efectividad de estos métodos (Forcellini, 2020).

6. Aplicación sobre la mesa sísmica: ensayos y resultados

El proceso de estudios experimentales consta de la incorporación de una capa de espuma de polietileno (PE) pegada sobre la placa deslizante de la mesa. Esta espuma es caracterizada en la Universidad de Santiago de Chile (USACH)¹, para obtener sus parámetros mecánicos tales como densidad ($\gamma = 32 \text{ kg/m}^3$) y módulo de elasticidad ($E = 34 \text{ kPa}$). La incorporación de esta espuma corresponde a la simulación de un elemento/tratamiento para la aislación sísmica basal, como alternativa a los métodos convencionales. Cabe destacar que las pruebas experimentales se centran en demostrar la versatilidad de este tipo de herramientas (mesa sísmica) frente a las necesidades actuales de estudio en materias de diversa índole, y a su vez, validar experimentalmente el uso de tratamientos geotécnicos como alternativa a la aislación sísmica convencional (H. H. Tsang et al., 2024).

Junto a este montaje, se emplea un segundo acelerómetro en la base de una segunda placa que se monta sobre la espuma para obtener las aceleraciones tras ser implementado el bloque de espuma.

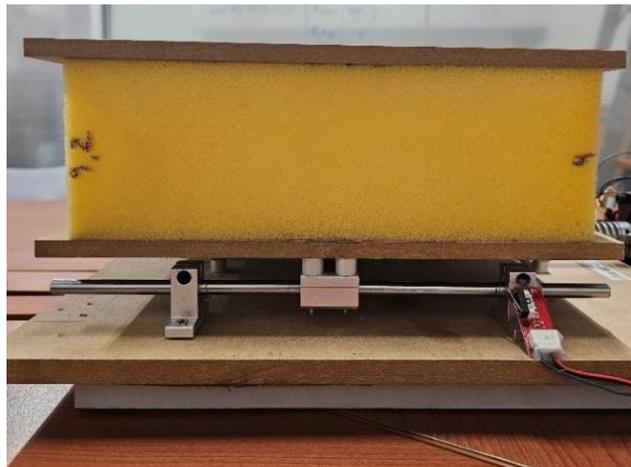


Ilustración 29: Vista de perfil del modelo final con la incorporación de espuma y placa superior

¹ Agradecimientos a Richard Magnere participante de dicho proceso en el marco de su colaboración con el Dr. Felipe Vicencio, quienes facilitaron los datos obtenidos así como la espuma de ensayo.



Para estas pruebas la hipótesis que rige el resultado esperado es que la capa de espuma absorba parte de la energía transmitida amortizando el impacto que la energía sísmica tendrá a nivel de superficie. Esto se basa en que la capa de espuma presenta una menor rigidez que el suelo en cuestión, por ende, la capacidad de deformaciones es mayor y a su vez esto disipa energía de manera significativa. Otra característica positiva de utilizar espuma es que la capacidad restitutiva es prácticamente completa a los niveles de escala en que se trabaja, manteniendo las propiedades geométricas al momento de efectuarse las pruebas.

Traduciendo esto a un caso de aplicación real, se busca que el material que se vaya a emplear como aislación, debe disipar energía de manera significativa, presentar una elasticidad mayor a la del suelo de fundación y debe mantener su homogeneidad al verse sometido a cargas, de lo contrario, se generarían asentamientos que significarían otro riesgo adicional para las estructuras.

Dicho esto, se espera que, al realizarse los ensayos, los resultados arrojen una disminución en los acelerogramas correspondientes a los construidos en base a las pruebas con espuma debido a la disipación de energía proveniente del material empleado como aislación.

6.1. Ensayos

La metodología de ensayo consta en registrar los valores de aceleraciones para el mismo registro sísmico escalado sobre la base deslizante de la mesa sísmica y sobre la placa por encima de la espuma, comparar los valores de aceleración por medio de los acelerogramas y analizar si la incorporación de un sistema como el expuesto es realmente factible de implementar según el impacto que genera en los experimentos (Banović et al., 2019).

Los distintos ensayos se guardan en archivos de extensión txt para posteriormente ser procesados mediante Microsoft Excel. Teniendo en cuenta las perturbaciones generadas por el cambio de sentido de giro del motor y debido a esto el filtrado o limpieza de datos, se proceden a construir los acelerogramas para las pruebas.

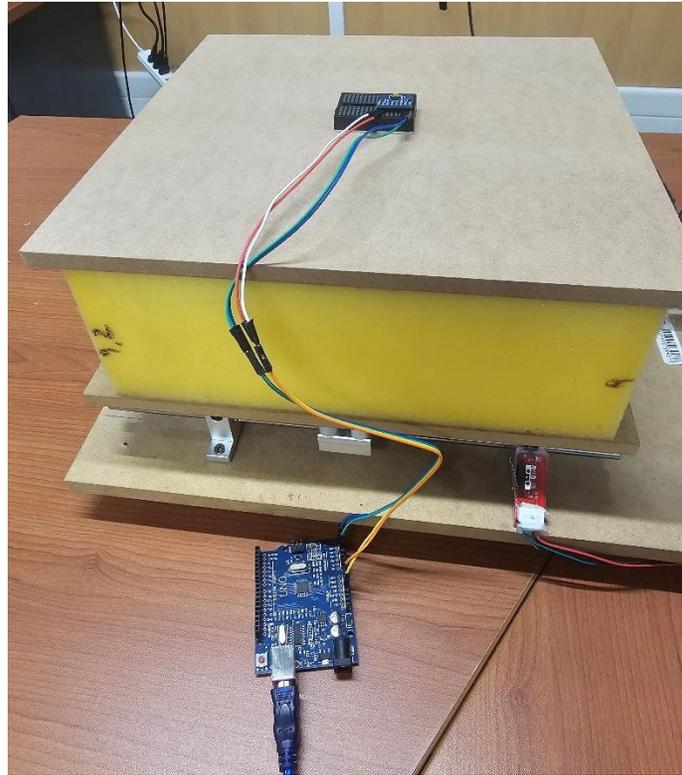


Ilustración 30: Acelerómetro ADXL345 sobre conjunto de placas y espuma para ensayo

En este caso el vector de movimiento empleado es el mismo durante todo el proceso para mantener una continuidad en los valores a replicar, de la misma manera, se mantienen fijos los valores correspondientes a los parámetros de configuración del motor que se extrajeron desde las pruebas de calibración.

Los ensayos no consideran elementos adicionales sobre las placas, salvo los acelerómetros y sus respectivas conexiones, respetando de la mejor manera posible el escenario neutro de ensayos donde no existan factores externos que generen perturbaciones en los ensayos.

La metodología empleada para realizar los ensayos consta de 5 pasos que se mantienen inamovibles tanto para las pruebas con la placa natural como con la espuma.

- i. Asegurar la herramienta de simulación a una superficie lo suficientemente rígida.

- ii. Realizar las conexiones correspondientes y asegurar la correcta transferencia de datos entre acelerómetros, microcontrolador y computador.
- iii. Permitir que se efectúe el proceso de auto calibración de la mesa previo al movimiento y visualmente corroborar que se ejecute dentro de los límites.
- iv. Revisar que la salida de datos no presente vacíos relacionados a problemas de conexión o errores en la rutina. Analizar y limpiar los datos según los criterios mencionados anteriormente.
- v. Construir los acelerogramas y analizar los resultados.

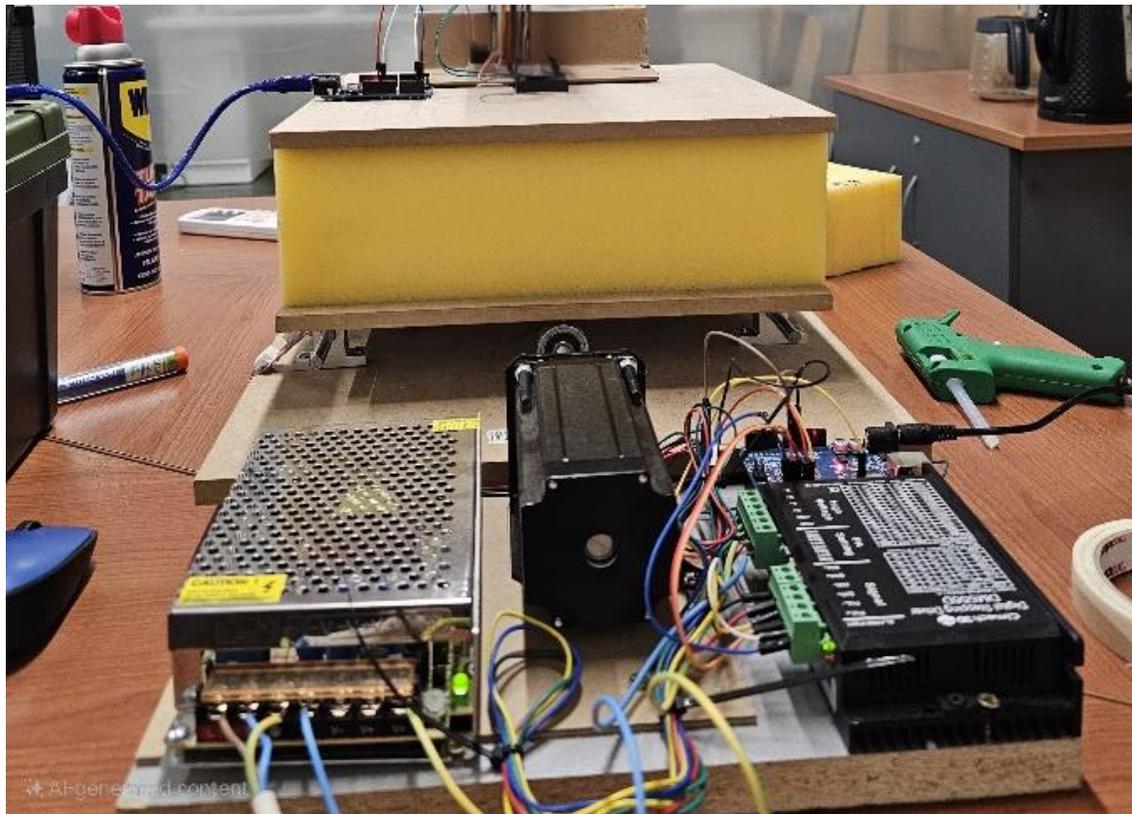


Ilustración 31: Formato de ensayo completo y ensamblaje

6.2. Resultados

Los resultados obtenidos son producto del análisis y manejo de los datos registrados en los ensayos realizados, donde los acelerogramas corresponden al producto final del ensayo y entregan la información necesaria para concluir con los objetivos específicos de este proyecto.

Corresponden a los resultados los grupos de acelerogramas que se presentarán a continuación, correspondientes a las pruebas efectuadas sin espuma, con la intención de obtener un registro sísmico tras el proceso de replicación, y posteriormente las pruebas correspondientes a la prueba de aislación con espuma de polietileno, donde los acelerogramas se reducen en magnitud producto de la disipación de energía por medio de esta capa.

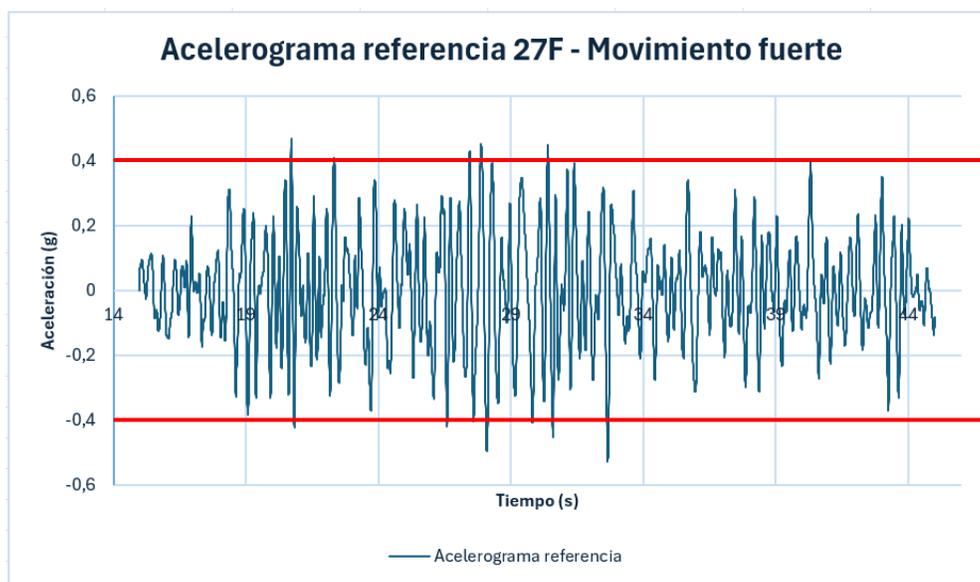


Ilustración 32: Sección del acelerograma del sismo utilizado

Para el rango del movimiento fuerte seleccionado como patrón de orientación, se observa que el movimiento se concentra bajo aceleraciones de $\pm 0.4g$ predominantemente, teniendo un peak de 527.295 cm/s^2 o $0.54g$ (PGA del sismo registrado en la estación Constitución en febrero del 2010) según el registro original entregado por el CSN.

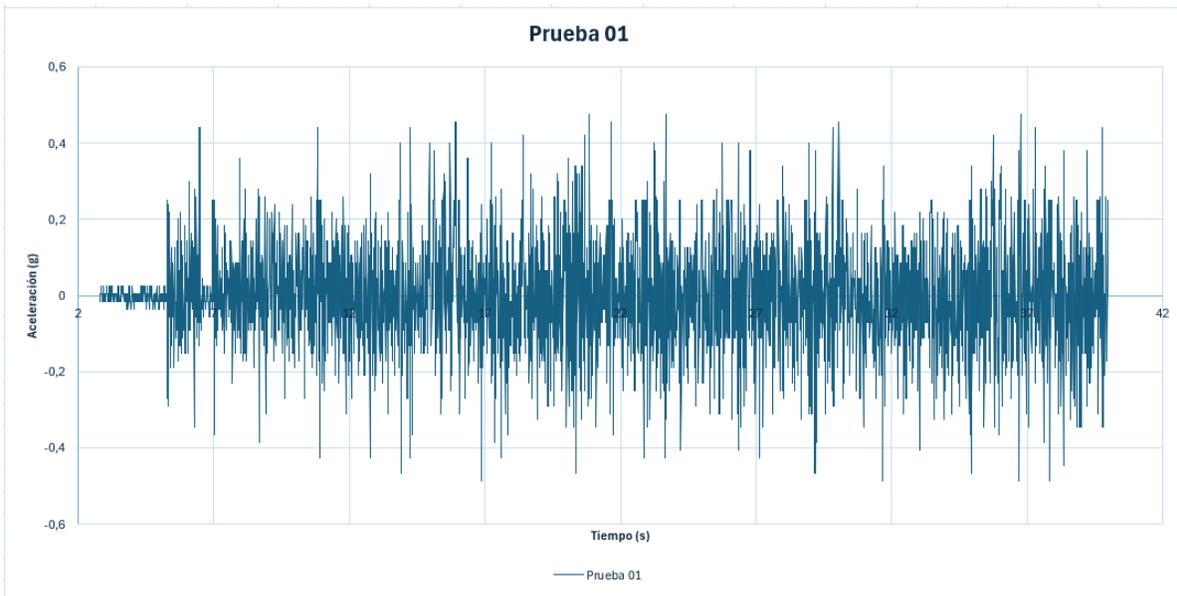


Ilustración 33: Acelerograma prueba 1

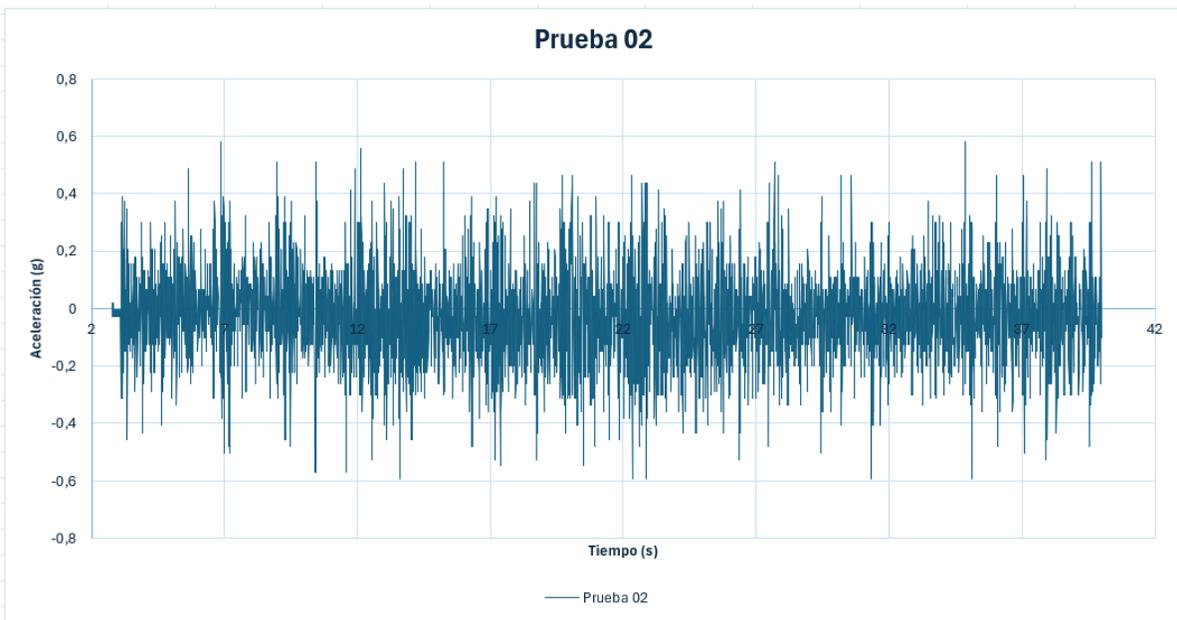


Ilustración 34: Acelerograma prueba 2

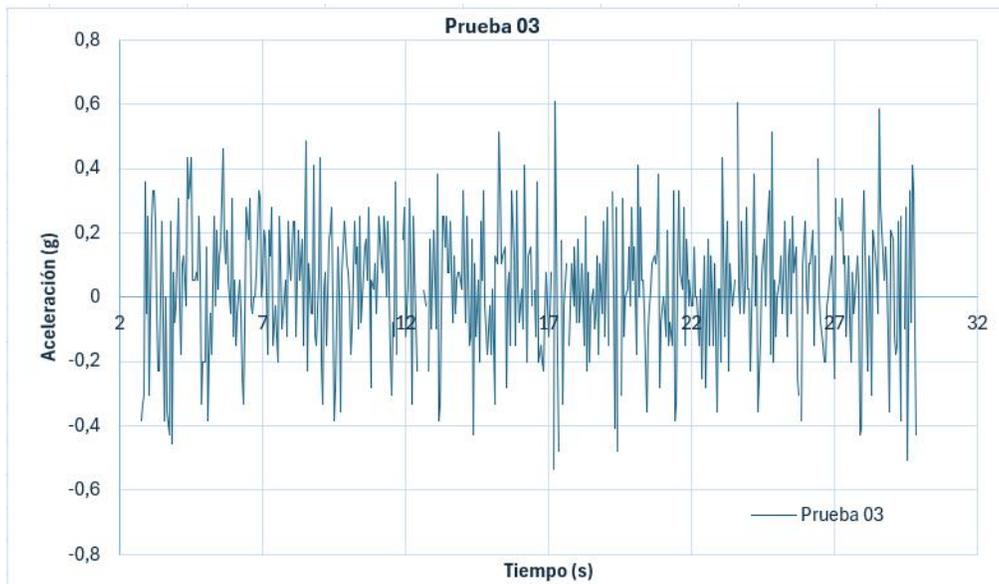


Ilustración 35: Acelerograma prueba 3

Las pruebas efectuadas se contrastan con el registro de aceleraciones original del sismo para verificar que la replicación se mantenga dentro de los márgenes esperados.

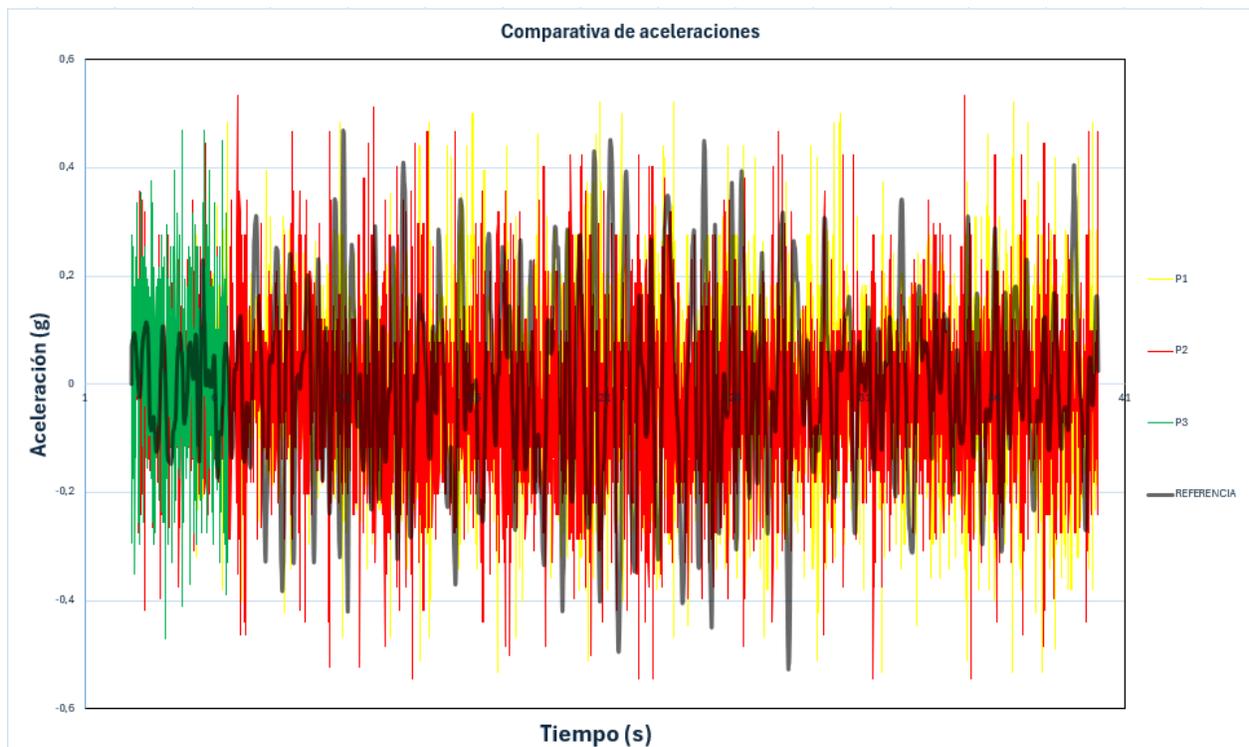


Ilustración 36: Comparativa de acelerogramas: original vs. Pruebas



La línea negra corresponde al registro original, mientras que la roja, verde y amarilla son las pruebas realizadas en la mesa sísmica con el registro simulado y adaptado. Las aceleraciones máximas se muestran a continuación:

REGISTRO	Original	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
PGA	0,54g	0,53g	0,54g	0,47g

Tabla 2: Valores de PGA registro original y pruebas

Se observa en base a los acelerogramas expuestos y los valores de la aceleración máxima como el proceso de replicación genera un registro que se encuentra dentro de los márgenes impuestos por la condición inicial. Los acelerogramas obtenidos muestran las aceleraciones esperadas, junto a un espectro que sigue la pauta en forma de un registro sísmico natural, obteniendo un movimiento irregular y no en base a ondas regulares que restan realidad a la simulación.

6.3. Resultados de pruebas con espuma

Como se discutió anteriormente, la incorporación de espuma simula un tratamiento geotécnico como alternativa a los sistemas tradicionales de aislación sísmica, por ende, el resultado esperable es observar acelerogramas con una magnitud de aceleraciones disminuida y, por ende, un PGA menor. La espuma utilizada para esta serie de ensayos no fue elegida particularmente para el mismo, por lo que sus características mecánicas no son especialmente adaptadas y elegidas para estas pruebas.

A partir de los resultados, es posible intuir que una espuma con menor densidad presentará una mejor capacidad aislante, disipando más energía que la empleada actualmente. Este ejercicio sirve para comprender como es posible la implementación de metodologías que apunten a un tratamiento indirecto a la estructura, mejorando las propiedades del suelo de fundación. Se propone según este contexto, como línea futura de investigación, el análisis experimental de espumas y/o sistemas de tratamiento basal

que se adecuen de mejor manera a los casos de estudio, elevando la capacidad de aislación teórica.

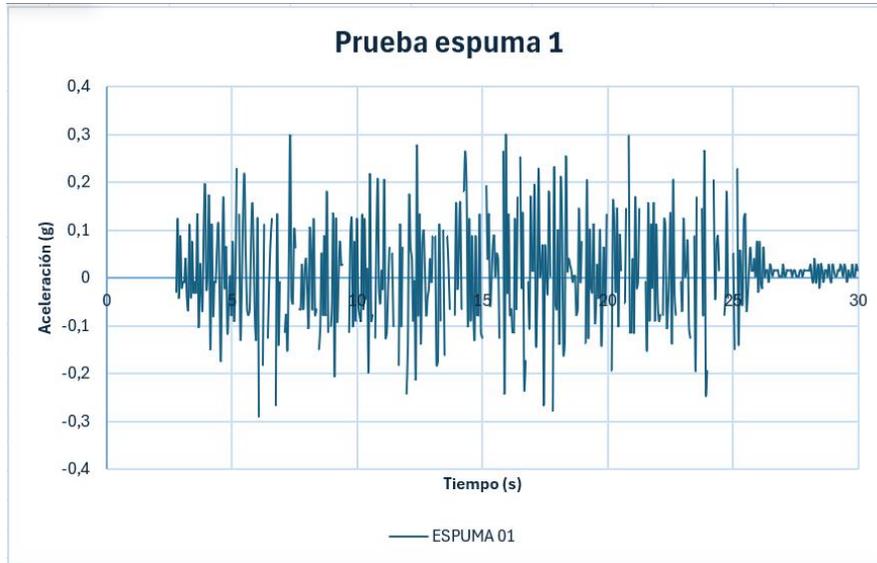


Ilustración 37: Acelerograma de prueba con espuma 1

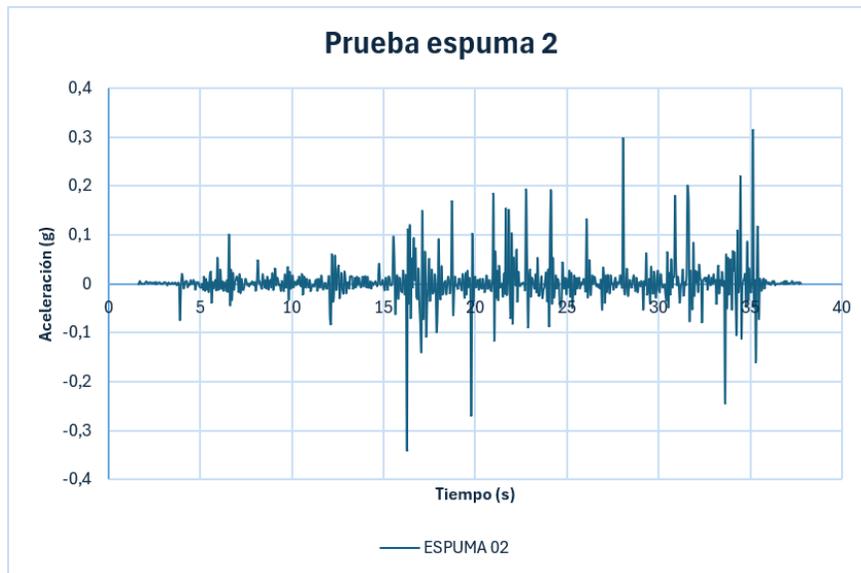


Ilustración 38: Acelerograma de prueba con espuma 2

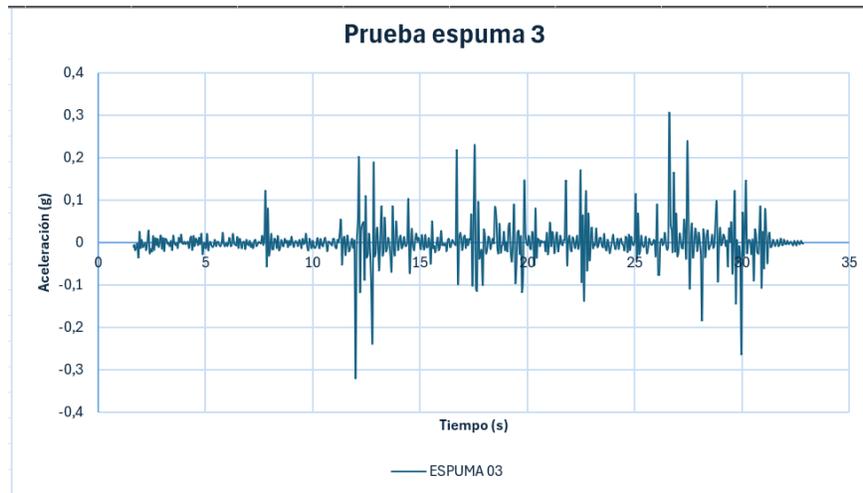


Ilustración 39: Acelerograma de prueba con espuma 3

Registro	Original	P1	P2	P3
PGA	0,54g	0,53g	0,54g	0,47g
PGA_PE	0,54g	0,297g	0,34g	0,32g
Diferencia	0,0g	0,233g (↓)	0,2g (↓)	0,15g (↓)

Tabla 3: Valores de PGA para pruebas con espuma (PE) y diferencias

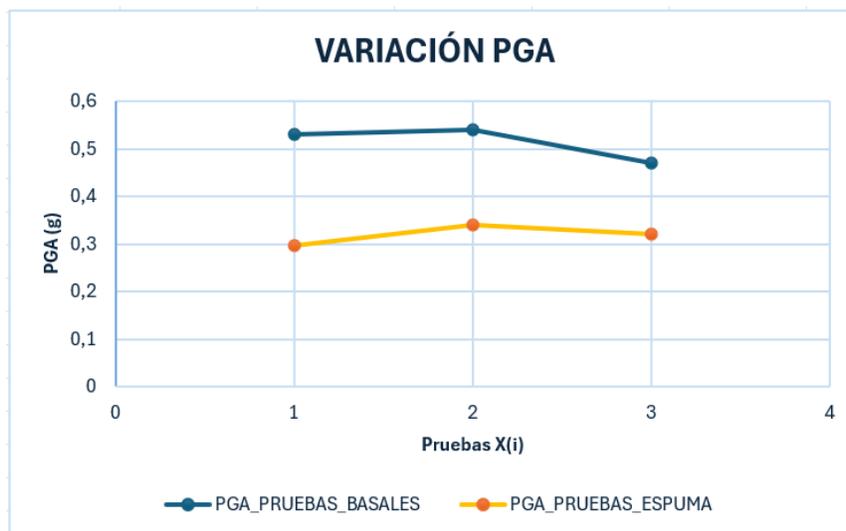


Ilustración 40: Variación del PGA según tipo de ensayo



De esta manera queda en evidencia que la implementación de espuma para las pruebas realizadas significa una disminución en el acelerograma de salida, validándose como un procedimiento factible para aislar 2 capas de suelo o base en el marco constructivo.

En concreto, las pruebas realizadas mostraron una reducción promedio del 38% del PGA en la base de la capa superior, sin optimizar las dimensiones y/o características de la espuma empleada.

Si bien las pruebas realizadas tienen como principal objetivo demostrar la versatilidad de la herramienta desarrollada, los resultados siembran una base para impulsar la continua mejora y desarrollo de técnicas ligadas a la ingeniería sísmo resistente, aumentando la resiliencia de las estructuras frente a eventos adversos, salvaguardando la vida de sus habitantes y ofreciendo alternativas variables frente a la oferta actual.

6.4. Recomendaciones a futuro

Se plantean además ideas de trabajos a futuro que sirvan para darle continuidad a este tipo de estudios mediante las herramientas proporcionadas:

- Diseño y construcción de una mesa sísmica de mayor tamaño para replicar registros con cargas sísmicas mayores, así como las dimensiones de las muestras a analizar.
- Caracterizar distintos materiales que sirvan en mayor medida para obtener resultados más favorables.
- Integrar las herramientas creadas con distintas áreas de la Facultad de Ingeniería, a modo de realizar ensayos y estudios multidisciplinarios.

Las propuestas anteriores corresponden a acciones que favorezcan el estudio de fenómenos dinámicos en un entorno educativo constante, a través de los docentes y estudiantes quienes serán los encargados de darle continuidad y proponer mejoras al proyecto. Además, se espera que estas herramientas sirvan para las acciones de difusión de la carrera de Ingeniería Civil y afines, como también para la colaboración inter-universidades y facultades.



7. Conclusiones

A través de la revisión de literatura, los ensayos y los resultados obtenidos de este trabajo, se destaca la importancia de contar con herramientas que se ajusten a las necesidades investigativas y de apoyo a estas. Las mesas sísmicas contribuyen en este aspecto proporcionando a los investigadores una forma de visualizar el efecto de cargas dinámicas sobre estructuras y modelos a escala, para ser analizados y comparados con otras metodologías de ensayo.

Una mesa sísmica, independiente de su escala, si es bien programada y configurada según los ensayos que se deseen realizar y las necesidades particulares de quien la opere, es una herramienta potente para apoyar los estudios numéricos de fenómenos dinámicos en estructuras. Además, permiten la investigación de alternativas a sistemas y elementos mediante el uso de replicas o modelos a escalas reducidas, aumentando su campo de aplicación no solo a universidades o laboratorios que posean la capacidad económica para costear ensayos de elevado costo, sino que también permitiendo a estudiantes y docentes hacer uso de estas herramientas y sumar resultados en el ámbito investigativo de manera accesible.

Hoy en día existe un amplio campo investigativo relacionado a la dinámica de estructuras, y cada vez son más los estudios que avalan metodologías no convencionales para la protección sísmica de estructuras, aplicables principalmente en países en vías de desarrollo. También, la comprensión de efectos dinámicos sobre estructuras se anexa a lo relacionado con la interfaz estructura-suelo, aislamiento y respuesta dinámica, abriendo el paso a las mesas sísmicas como potenciales generadores de resultados en estas y otras materias de investigación relacionadas a la ingeniería estructural y geotécnica.



8. Anexos

8.1. Código Arduino operación del motor

// Pines para el driver del motor

const int pulPin = 2; // Pin de PUL (pasos)

const int dirPin = 3; // Pin de DIR (dirección)

const int enaPin = 4; // Pin de ENA (habilitación)

// Pines de los finales de carrera

const int limiteIzqPin = 5; // Pin del final de carrera izquierdo

const int limiteDerPin = 6; // Pin del final de carrera derecho

// Vector de datos que indica el número de pasos

int vectorDatos[] = {};

const int velocidadMicrosegundos = ;

int contador = 0;

void setup() {

// Configuración de pines

pinMode(pulPin, OUTPUT);

pinMode(dirPin, OUTPUT);

pinMode(enaPin, OUTPUT);

pinMode(limiteIzqPin, INPUT_PULLUP); // Configurado con resistencia interna de pull-up

pinMode(limiteDerPin, INPUT_PULLUP); // Configurado con resistencia interna de pull-up

// Inicialización del puerto serial

Serial.begin(9600);

// Habilitar el motor

digitalWrite(enaPin, LOW); // LOW activa el driver en la mayoría de los casos



```
// Proceso de calibración
calibrarMesa();
}

void loop() {
    // Recorre el vector de datos y ejecuta movimiento
    for (int i = 0; i < sizeof(vectorDatos) / sizeof(vectorDatos[0]); i++) {
        int pasosTotales = vectorDatos[i];

        if (pasosTotales != 0) {
            // Configurar la dirección según el signo
            bool sentidoHorario = (pasosTotales > 0);
            digitalWrite(dirPin, sentidoHorario ? HIGH : LOW);

            // Ejecutar los pasos respetando los límites
            for (int paso = 0; paso < abs(pasosTotales); paso++) {
                // Verificar los finales de carrera
                if ((!sentidoHorario && digitalRead(limiteIzqPin) == LOW) ||
                    (sentidoHorario && digitalRead(limiteDerPin) == LOW)) {
                    // Detener el movimiento si se alcanza un tope
                    Serial.println("Límite alcanzado, deteniendo movimiento.");
                    break;
                }
            }

            // Realizar un paso
            digitalWrite(pulPin, HIGH);
            delayMicroseconds(velocidadMicrosegundos);
            digitalWrite(pulPin, LOW);
            delayMicroseconds(velocidadMicrosegundos);
        }
    }
}
```



```
while (true);
}

// Función para realizar el proceso de calibración
void calibrarMesa() {
  Serial.println("Iniciando calibración...");

  // Girar hacia el final de carrera izquierdo hasta presionar
  digitalWrite(dirPin, LOW);
  while (digitalRead(limiteIzqPin) == HIGH) {
    digitalWrite(pulPin, HIGH);
    delayMicroseconds(velocidadMicrosegundos);
    digitalWrite(pulPin, LOW);
    delayMicroseconds(velocidadMicrosegundos);
  }
  Serial.println("Final de carrera izquierdo presionado");

  // Detener el motor momentáneamente
  delay(500); // Pausa para estabilidad

  // Contar el número de pasos hasta llegar al final de carrera
  contador = 0;
  while (digitalRead(limiteDerPin) == HIGH) {
    digitalWrite(dirPin, HIGH);
    digitalWrite(pulPin, HIGH);
    delayMicroseconds(velocidadMicrosegundos);
    digitalWrite(pulPin, LOW);
    delayMicroseconds(velocidadMicrosegundos);
    contador++;
  }
  Serial.println("Final de carrera derecho presionado");

  // Calcular la posición media
```



```
int puntoDeCalibracion = contador / 2;
Serial.print("Punto de calibración: ");
Serial.println(puntoDeCalibracion);

// Regresar al punto de calibración
for (int paso = 0; paso < puntoDeCalibracion; paso++) {
  digitalWrite(dirPin, LOW);
  digitalWrite(pulPin, HIGH);
  delayMicroseconds(velocidadMicrosegundos);
  digitalWrite(pulPin, LOW);
  delayMicroseconds(velocidadMicrosegundos);
}
Serial.println("Calibración completada. Posición inicial establecida.");
}
```

8.2. Código de lectura de aceleración mediante Arduino IDE

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_ADXL345_U.h>

Adafruit_ADXL345_Unified accel = Adafruit_ADXL345_Unified(12345);

float offset_x = 0.0; // Variable para almacenar el offset de calibración

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Configuración del puerto serie
  if (!accel.begin()) {
    Serial.println("No se encontró un sensor ADXL345.");
    while (1);
  }
}
```



```
accel.setRange(ADXL345_RANGE_4_G);

// Calibración del sensor en reposo
Serial.println("Calibrando el sensor...");
float suma_x = 0.0;
int muestras = 100;

for (int i = 0; i < muestras; i++) {
  sensors_event_t event;
  accel.getEvent(&event);
  suma_x += event.acceleration.x;
  delay(10); // Espera entre lecturas
}

offset_x = suma_x / muestras;
Serial.print("Calibración completa. Offset X: ");
Serial.println(offset_x);
}

void loop() {
  sensors_event_t event;
  accel.getEvent(&event);

  // Leer la aceleración en el eje X directamente en g y compensar el offset
  float acceleration_x = event.acceleration.x - offset_x;

  // Enviar solo la aceleración en X
  Serial.println(acceleration_x);

  // Espera para cumplir con un intervalo de 5 ms (200 Hz)
  delay(50);
}
```



8.3. Código para lectura de aceleraciones desde Python

```
import serial
import time
import re

# Configuración del puerto serial
PORT = 'COMxx'
BAUDRATE = 9600
OUTPUT_FILE = 'aceleracion.txt'

# Abrir el puerto serial
try:
    ser = serial.Serial(PORT, BAUDRATE, timeout=1)
    print(f"Conectado al puerto {PORT}")
except serial.SerialException as e:
    print(f"No se pudo conectar al puerto {PORT}: {e}")
    exit()

# Crear y abrir el archivo para escribir los datos
with open(OUTPUT_FILE, 'w') as file:
    file.write("Tiempo (s),Aceleración (g)\n") # Encabezado del archivo

# Tiempo de referencia
start_time = time.time()

try:
    while True:
        # Leer línea desde el puerto serial
        line = ser.readline().decode('utf-8').strip()

        if line: # Si la línea no está vacía
```



try:

Usar expresiones regulares para extraer el número

```
match = re.search(r"-?\d+\.\d+", line)
```

if match:

Convertir la lectura a un valor float

```
acceleration_g = float(match.group(0))
```

Calcular el tiempo transcurrido desde el inicio

```
elapsed_time = time.time() - start_time
```

Escribir los datos en el archivo

```
file.write(f"{elapsed_time:.2f},{acceleration_g:.4f}\n")
```

```
file.flush() # Asegurarse de escribir en el archivo inmediatamente
```

```
print(f"Tiempo: {elapsed_time:.2f} s, Aceleración: {acceleration_g:.4f} g")
```

else:

```
print(f"Línea no válida (sin número): {line}")
```

except ValueError:

```
print(f"Error al procesar la línea: {line}")
```

except KeyboardInterrupt:

```
print("\nFinalizando la captura de datos...")
```

finally:

```
ser.close()
```

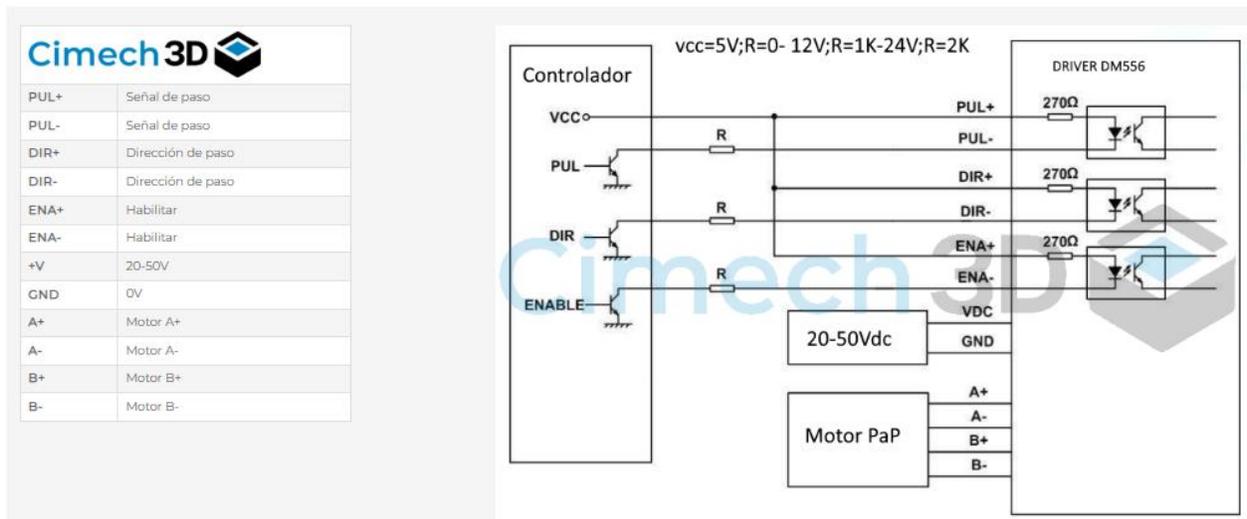
```
print("Conexión serial cerrada.")
```

8.4. Características del motor NEMA 23

Tipo de motor	Paso a paso bipolar
Ángulo desplazamiento	1.8°/paso
Torque (Holding)	3 N.m
Voltaje de operación	3.9 V
Corriente máxima/fase	3 A
Resistencia de una fase	1.6 ohms
Inductancia	6.8 mH ± 20% (1KHz)
Número de cables	4

Bipolar NEMA	23
Largo (L)	111 mm
Ancho (W)	56 mm
Alto (H)	56 mm
Diámetro del eje (D)	8 mm
Largo del eje (l)	18.2 mm
Doble Eje?	No
Número de cables	4
Largo de los cables (l)	762 mm
Cable removible?	No
Peso	N/D

8.5. Características controlador DM556 (Página web Cimech3D)





9. Referencias

- Abdulaziz, M. A., Hamood, M. J., & Fattah, M. Y. (2023). A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil – Structure interaction. *Structures*, 52, 348–369. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.186>
- Baig, M. D., Saif, A. M. A., Mbah, O., Yildirim, U., Ozankaya, G., & Zeeshan, Q. (2024). Development and Evaluation of an Economical Arduino-Based Uniaxial Shake Table for Earthquake and Wave Simulation. *Journal of Engineering Management and Systems Engineering*, 3(2), 82–92. <https://doi.org/10.56578/jemse030203>
- Banović, I., Radnić, J., & Grgić, N. (2019). Geotechnical seismic isolation system based on sliding mechanism using stone pebble layer: Shake-table experiments. *Shock and Vibration*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9346232>
- Cámara Chilena de la Construcción, & Corporación de Desarrollo Tecnológico. (2011). *Protección Sísmica de Estructuras*. www.cdt.cl
- Castro, S., Benavente, R., Crempien, J. G. F., Candia, G., & de la Llera, J. C. (2022). A Consistently Processed Strong-Motion Database for Chilean Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 93(5), 2700–2718. <https://doi.org/10.1785/0220200336>
- Contreras, M., & Winckler, P. (2013). *Pérdidas de vidas, viviendas, infraestructura y embarcaciones por el tsunami del 27 de Febrero de 2010 en la costa central de Chile*.
- Damcı, E., & Şekerci. (2019). Development of a Low-Cost Single-Axis Shake Table Based on Arduino. *Experimental Techniques*, 43(2), 179–198. <https://doi.org/10.1007/s40799-018-0287-5>
- Dhanya, J. S. (2023). Innovative geotechnical solution for base isolation. In *Smart Geotechnics for Smart Societies* (pp. 219–228). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003299127-19>
- Dhanya, J. S., Boominathan, A., & Banerjee, S. (2020). Response of low-rise building with geotechnical seismic isolation system. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 136, 106187. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106187>
- Forcellini, D. (2020). Assessment of Geotechnical Seismic Isolation (GSI) as a Mitigation Technique for Seismic Hazard Events. *Geosciences*, 10(6), 222. <https://doi.org/10.3390/geosciences10060222>



Gómez, R. (2022). *DESARROLLO DE UNA MESA SÍSMICA A BAJO COSTO CON FINES EDUCACIONALES*.

Gueguen, P. (2000). Experimental and Numerical Analysis of Soil Motions Caused by Free Vibrations of a Building Model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), 1464–1479. <https://doi.org/10.1785/0119990072>

Hacienda, M. (2023). *Ministerio de Hacienda cifra en US\$759 millones el daño económico de los temporales en zona centro sur del país*. Ministerio de Hacienda Cifra En US\$759 Millones El Daño Económico de Los Temporales En Zona Centro Sur Del País.

Leyton, F., Ruiz, S., & Sepúlveda, S. (2010). *Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central*.

Morales, J. (2017). *Diseño, prototipaje y caracterización de una mesa sísmica de 1 grado de libertad a escala*.

Naserkhaki, S., & Pourmohammad, H. (2012). SSI AND SSSI EFFECTS IN SEISMIC ANALYSIS OF TWIN BUILDINGS: DISCRETE MODEL CONCEPT. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(6), 890–898. <https://doi.org/10.3846/13923730.2012.734850>

National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP). (2012). *Soil-Structure Interaction for Building Structures*.

Pistolas, G. A., Anastasiadis, A., & Ptilakis, K. (2018). Dynamic Behaviour of Granular Soil Materials Mixed with Granulated Rubber: Effect of Rubber Content and Granularity on the Small-Strain Shear Modulus and Damping Ratio. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(2), 1267–1281. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0391-9>

Ptilakis, D., Anastasiadis, A., Vratsikidis, A., Kapouniaris, A., Massimino, M. R., Abate, G., & Corsico, S. (2021). Large-scale field testing of geotechnical seismic isolation of structures using gravel-rubber mixtures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(10), 2712–2731. <https://doi.org/10.1002/eqe.3468>

Razzouk, Y., Ahatri, M., Baba, K., & El Majid, A. (2023). Optimal Bracing Type of Reinforced Concrete Buildings with Soil-Structure Interaction Taken into Consideration. *Civil Engineering Journal*, 9(6), 1371–1388. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-06-06>

Rives, D. (2018). *DISEÑO DE UNA MESA SÍSMICA A ESCALA*.



- Somoza, R., & Ghidella, M. (2005). *Convergencia en el margen occidental de América del Sur durante el Cenozoico*.
- Soto, M. (2022). *CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA DE SIMULACIÓN SÍSMICA*.
- Tabar, A., Russ, G., & Mason, B. (2018). *Design of a Two-Axis Shaking Table to Simulate Earthquakes in an Educational Setting*. <http://www.econ-group.com/product/?id=>
- Taylor, A. W., & Igusa, T. (Eds.). (2004). *Primer on Seismic Isolation*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784407516>
- Trombetta, N. W., Mason, H. B., Hutchinson, T. C., Zupan, J. D., Bray, J. D., & Kutter, B. L. (2014). Nonlinear Soil–Foundation–Structure and Structure–Soil–Structure Interaction: Centrifuge Test Observations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001074](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001074)
- Tsang, H. H., Tran, D. P., Hung, W. Y., & Gad, E. F. (2024). Geotechnical seismic isolation based on high-damping polyurethane: centrifuge modelling. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(4), 2001–2023. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01842-4>
- Tsang, H.-H. (2009). Geotechnical Seismic Isolation. In T. Miura & I. Yuuki (Eds.), *Earthquake Engineering* (pp. 55–87). Nova Science Publishers, Inc.
- Tsang, H.-H., & Pitilakis, K. (2019). Mechanism of geotechnical seismic isolation system: Analytical modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 122, 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.037>
- UNIDAD DE REDUCCIÓN DE RIESGO DE DESASTRES, & MINISTERIO DE EDUCACIÓN. (n.d.). *Terremoto 27F – Emergencia y desastre*. <https://Emergenciaydesastres.Mineduc.Cl/Terremoto-27f/>.
- Velozo, L. (2021). *Alfred Wegner, un científico visionario del siglo XX* (Vol. 27).
- Vicencio, F., & Alexander, N. A. (2024). Seismic evaluation of Site-City interaction effects between city blocks. *Frontiers in Built Environment*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1403642>
- Vicencio, F., Alexander, N. A., & Saavedra Flores, E. I. (2023). A State-of-the-Art review on Structure-Soil-Structure interaction (SSSI) and Site-City interactions (SCI). *Structures*, 56, 105002. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105002>



- Vicencio, F., Torres-Olivares, S., Miranda-Garnica, M., Flores, E. I. S., & Málaga-Chuquitaype, C. (2024). Seismic assessment of SSSI effects between adjacent Cross-Laminated Timber (CLT) buildings. *Structures*, 69, 107318. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107318>
- Vratsikidis, A., & Pitilakis, D. (2023). Field testing of gravel-rubber mixtures as geotechnical seismic isolation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(8), 3905–3922. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01541-6>