



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Pruebas experimentales en  
mesa vibradora de un  
modelo de edificio equipado  
con aisladores sísmicos de  
tipo deslizante**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Emiliano Yael Aguilar García

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado PRUEBAS EXPERIMENTALES EN MESA VIBRADORA DE UN MODELO DE EDIFICIO EQUIPADO CON AISLADORES SISMICOS DE TIPO DESLIZANTE que presenté para obtener el título de INGENIERO CIVIL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

---

**EMILIANO Yael AGUILAR GARCIA**  
Número de cuenta: 318073325

# Dedicatoria

La presente tesis está dedicada a mis padres, Mariel García y Alfredo Aguilar, quienes son las personas que más admiro y quiero, por todo lo que han hecho por mí y por todos los que nos han rodeado; los cuales son tan admirables como responsables que, a pesar de las circunstancias que han enfrentado, nunca se han dado por vencidos.

A Margarita, que estuvo conmigo y me cuidó desde el día en que nací, y que ha estado junto a mí en los momentos que más lo he necesitado.

A Luis Ángel, mi hermano, el cual me ha demostrado el verdadero significado de la palabra resiliencia, sobrepasando todas las adversidades que se han presentado.

A Sofía Morales, Maximino García, Sofía Aguilar y Sadot Aguilar, mis abuelos, quienes desde el primer día me depositaron su confianza, sé que siempre voy a tenerlos presentes.

A todos mis tíos, primos y familiares, porque las experiencias compartidas con cada uno de ustedes me han formado como persona.

# Agradecimientos

Le agradezco al Doctor Héctor Guerrero Bobadilla por las enseñanzas y los consejos que me ha brindado, además de ser el director de la presente tesis e incluirme en diversas actividades que han contribuido a mi formación académica y profesional.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por el apoyo económico y por permitirme utilizar sus instalaciones para realizar las pruebas experimentales necesarias para la realización del presente trabajo, especialmente al laboratorio de geotecnia.

A la Facultad de Ingeniería y a todos sus profesores, que contribuyeron en mi formación compartiendo sus conocimientos y experiencias.

A la UNAM, por haberme abierto las puertas desde la Escuela Nacional Preparatoria hasta mi etapa universitaria.

A mi familia, los cuales siempre me apoyaron de manera incondicional y me comprendieron en cada etapa de mi vida.

A mis amigos Mariana, Gael, Jorge y Aldo, quienes me acompañaron a lo largo de mi carrera universitaria y me demostraron que la amistad se manifiesta de diferentes maneras; fueron los mejores compañeros de trabajos y desvelos.

Para finalizar, nada de esto cobraría sentido sin cada uno de los amigos o conocidos con los que he tenido el placer de convivir; cada uno de ustedes me convirtió en la persona que soy hoy en día.

# Resumen

En la Ciudad de México existen diversos tipos de suelos y zonas sísmicas, lo que representa un problema real, pues ello ocasiona distintos comportamientos dinámicos en las construcciones. Resulta entonces necesario el redesarrollo e implementación de tecnologías innovadoras que mejoren el desempeño sísmico de las estructuras.

El objetivo del presente trabajo es presentar los resultados de pruebas experimentales en mesa vibradora de una estructura equipada con una tecnología denominada aislamiento sísmico para, de esta manera, determinar su efectividad ante acciones sísmicas.

El programa de pruebas consistió en movimientos de Ruido blanco tipo RMS de 200 Gal, un movimiento Senoidal con frecuencia de 2.0 Hz y amplitud de 75 mm, el movimiento sísmico CH84 del 19 de septiembre de 2017 al 100% y el movimiento sísmico SCT del 19 de septiembre de 1985 al 75%. Cada uno de estos movimientos contó con duraciones y aceleraciones diferentes.

Como parte del análisis de los resultados se presentan registros de aceleraciones y desplazamientos obtenidos por medio de acelerómetros ubicados en la mesa vibradora, en el sistema de aislamiento sísmico y en la estructura; así como también el deslizamiento de los aisladores, los desplazamientos relativos de entrepiso, las funciones de transferencia de la estructura y las curvas de histéresis del sistema de aislamiento.

En el presente trabajo se demostraron reducciones de aceleraciones significativas en los aisladores (40% a 60%, aproximadamente) y deslizamientos significativos en el aislador (hasta 113.3 mm para el movimiento CH84 al 100%), entre otros parámetros de interés.

Al final se concluye que el uso de aislamiento sísmico genera beneficios importantes en el diseño de estructuras, particularmente en el modelo estudiado en este proyecto de investigación.

# Contenido

Introducción.....	10
Planteamiento del problema .....	10
Motivación.....	12
Objetivos.....	13
Alcances.....	13
Organización de la tesis .....	14
Capítulo 1. Aislamiento sísmico.....	16
1.1 Descripción general .....	16
1.2 Principios fundamentales.....	17
1.3 Tipos de aisladores .....	18
1.4 Aplicaciones .....	22
Capítulo 2. Pruebas experimentales en mesa vibradora .....	24
2.1 Descripción del modelo .....	24
2.2 Configuración del experimento .....	27
2.3 Programa de pruebas .....	30
2.4 Instrumentación .....	31
Capítulo 3. Resultados.....	35
3.1 Aceleraciones medidas .....	35
3.1.1 Ruido blanco.....	35
3.1.2 Movimiento senoidal.....	39
3.1.3 Movimiento sísmico CH84.....	41
3.1.4 Movimiento sísmico SCT.....	43
3.2 Desplazamientos laterales .....	45
3.2.1 Ruido blanco.....	45
3.2.2 Movimiento senoidal.....	48
3.2.3 Movimiento sísmico CH84.....	50
3.2.4 Movimiento sísmico SCT.....	52
3.3 Deslizamiento y distorsiones de entrepiso.....	54

3.4 Funciones de transferencia .....	60
3.5 Curvas de histéresis de los aisladores .....	64
Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones .....	69
4.1 Conclusiones.....	69
4.2 Recomendaciones .....	71
Referencias .....	72
Anexos .....	74
Anexo A. Aceleraciones medidas .....	74
A.1. Movimiento senoidal .....	74
A.2. Movimiento sísmico CH84.....	76
A.3. Movimiento sísmico SCT .....	77
Anexo B. Desplazamientos laterales .....	79
B.1. Movimiento senoidal .....	79
B.2. Movimiento sísmico CH84.....	80
B.3. Movimiento sísmico SCT .....	82
Anexo C. Deslizamiento y desplazamiento relativo.....	84
C.1. Ruido blanco .....	84
C.2. Movimiento senoidal .....	85
C.3. Movimiento sísmico CH84.....	86
C.4. Movimiento sísmico SCT .....	87

# Índice de figuras

Figura 1. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México. Imagen tomada de la NTC-Cimentaciones (2023).....	11
Figura 2. Aislador sísmico de apoyo de neopreno laminado.....	18
Figura 3. Aislador sísmico de apoyo de neopreno con núcleo de plomo. ....	19
Figura 4. Aislador sísmico de péndulo de fricción con curvatura simple. ....	20
Figura 5. Aislador sísmico de péndulo de fricción con curvatura doble. ....	21
Figura 6. Croquis de vista en planta de la estructura, plano XY .....	24
Figura 7. Croquis de vista de perfil de la estructura, plano XZ.....	25
Figura 8. Croquis de vista de perfil de la estructura, plano YZ.....	25
Figura 9. Armado de la estructura. ....	26
Figura 10. Aisladores sísmicos instalados en mesa vibradora.....	27
Figura 11. Articulación colocada entre placas de aislador sísmico. ....	27
Figura 12. Croquis de vista en planta de estructura aislada, plano XY. ....	28
Figura 13. Estructura aislada en mesa vibradora.....	29
Figura 14. Croquis de vista en planta de estructura aislada instrumentada en mesa vibradora, plano XY.....	31
Figura 15. Croquis de vista en planta de estructura aislada instrumentada en mesa vibradora, plano XZ.....	32
Figura 16. Croquis de vista en planta de estructura aislada instrumentada en mesa vibradora, plano YZ. ....	32
Figura 17. Vista en planta de acelerómetros CH01 y CH02.....	33
Figura 18. Acelerómetros CH01, CH02, CH07 y CH08. ....	33
Figura 19. Vista en planta de acelerómetro CH06.....	34
Figura 20. Vista en planta de acelerómetros de CH05 y CH09.....	34
Figura 21. Registro de aceleraciones de CH01. Ruido blanco. ....	36
Figura 22. Registro de aceleraciones de CH02. Ruido blanco. ....	36
Figura 23. Registro de aceleraciones de CH05. Ruido blanco. ....	37
Figura 24. Comparación de aceleraciones en mesa vibradora y aislador sísmico. Ruido blanco. ....	37
Figura 25. Comparación de aceleraciones en aislador sísmico y cima de estructura. Ruido blanco. ....	38
Figura 26. Comparación de aceleraciones en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento senoidal.....	39
Figura 27. Comparación de aceleraciones en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento senoidal.....	40
Figura 28. Comparación de aceleraciones en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento sísmico CH84. ....	41

Figura 29. Comparación de aceleraciones en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento sísmico CH84.....	42
Figura 30. Comparación de aceleraciones en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento sísmico SCT.....	43
Figura 31. Comparación de aceleraciones en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento sísmico SCT.....	44
Figura 32. Historia de desplazamientos de CH01. Ruido blanco.....	45
Figura 33. Historia de desplazamientos de CH02. Ruido blanco.....	46
Figura 34. Historia de desplazamientos de CH05. Ruido blanco.....	46
Figura 35. Comparación de desplazamientos en mesa vibradora y aislador sísmico. Ruido blanco.....	47
Figura 36. Comparación de desplazamientos en aislador sísmico y cima de estructura. Ruido blanco.....	47
Figura 37. Comparación de desplazamientos en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento senoidal.....	48
Figura 38. Comparación de desplazamientos en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento senoidal.....	49
Figura 39. Comparación de desplazamientos en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento sísmico CH84.....	50
Figura 40. Comparación de desplazamientos en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento sísmico CH84.....	51
Figura 41. Comparación de desplazamientos en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento sísmico SCT.....	52
Figura 42. Comparación de desplazamientos en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento sísmico SCT.....	53
Figura 43. Deslizamiento generado en el aislador sísmico. Ruido blanco.....	54
Figura 44. Desplazamiento relativo en entrepiso. Ruido blanco.....	55
Figura 45. Deslizamiento generado en el aislador sísmico. Movimiento senoidal.....	56
Figura 46. Desplazamiento relativo en entrepiso. Movimiento senoidal.....	56
Figura 47. Deslizamiento generado en el aislador sísmico. Movimiento sísmico CH84.....	57
Figura 48. Desplazamiento relativo en entrepiso. Movimiento sísmico CH84.....	58
Figura 49. Deslizamiento generado en el aislador sísmico. Movimiento sísmico SCT.....	58
Figura 50. Desplazamiento relativo en entrepiso. Movimiento sísmico SCT.....	59
Figura 51. Función de transferencia correspondiente al movimiento ruido blanco.....	60
Figura 52. Función de transferencia correspondiente al movimiento senoidal.....	61
Figura 53. Función de transferencia correspondiente al movimiento sísmico CH84.....	62
Figura 54. Función de transferencia correspondiente al movimiento sísmico SCT.....	62
Figura 55. Curva de histéresis del movimiento ruido blanco.....	65
Figura 56. Curva de histéresis del movimiento senoidal.....	66
Figura 57. Curva de histéresis del movimiento sísmico CH84.....	67

Figura 58. Curva de histéresis del movimiento sísmico SCT.....	68
Figura 59. Registro de aceleraciones de CH01. Movimiento senoidal. ....	74
Figura 60. Registro de aceleraciones de CH02. Movimiento senoidal. ....	75
Figura 61. Registro de aceleraciones de CH05. Movimiento senoidal. ....	75
Figura 62. Registro de aceleraciones de CH01. Movimiento sísmico CH84. ....	76
Figura 63. Registro de aceleraciones de CH02. Movimiento sísmico CH84. ....	76
Figura 64. Registro de aceleraciones de CH05. Movimiento sísmico CH84. ....	77
Figura 65. Registro de aceleraciones de CH01. Movimiento sísmico SCT. ....	77
Figura 66. Registro de aceleraciones de CH02. Movimiento sísmico SCT. ....	78
Figura 67. Registro de aceleraciones de CH05. Movimiento sísmico SCT. ....	78
Figura 68. Historia de desplazamientos de CH01. Movimiento senoidal. ....	79
Figura 69. Historia de desplazamientos de CH02. Movimiento senoidal. ....	79
Figura 70. Historia de desplazamientos de CH05. Movimiento senoidal. ....	80
Figura 71. Historia de desplazamientos de CH01. Movimiento sísmico CH84. ....	80
Figura 72. Historia de desplazamientos de CH02. Movimiento sísmico CH84. ....	81
Figura 73. Historia de desplazamientos de CH05. Movimiento sísmico CH84. ....	81
Figura 74. Historia de desplazamientos de CH01. Movimiento sísmico SCT. ....	82
Figura 75. Historia de desplazamientos de CH02. Movimiento sísmico SCT. ....	82
Figura 76. Historia de desplazamientos de CH05. Movimiento sísmico SCT. ....	83
Figura 77. Deslizamiento entre CH01 y CH02. Ruido blanco. ....	84
Figura 78. Desplazamiento relativo entre CH02 y CH05. Ruido blanco. ....	84
Figura 79. Deslizamiento entre CH01 y CH02. Movimiento senoidal. ....	85
Figura 80. Desplazamiento relativo entre CH02 y CH05. Movimiento senoidal. ....	85
Figura 81. Deslizamiento entre CH01 y CH02. Movimiento sísmico CH84. ....	86
Figura 82. Desplazamiento relativo entre CH02 y CH05. Movimiento sísmico CH84. ....	86
Figura 83. Deslizamiento entre CH01 y CH02. Movimiento sísmico SCT. ....	87
Figura 84. Desplazamiento relativo entre CH02 y CH05. Movimiento sísmico SCT. ....	87

# Índice de tablas

Tabla 1. Programa de pruebas utilizado.....	30
Tabla 2. Aceleraciones máximas. ....	44
Tabla 3. Desplazamientos máximos. ....	53
Tabla 4. Deslizamientos y desplazamientos relativos. ....	59
Tabla 5. Frecuencias y periodos fundamentales de la estructura.....	63

# Introducción

## Planteamiento del problema

Históricamente, en la Ciudad de México se han presentado movimientos sísmicos de gran intensidad, que han afectado diversas construcciones y modificado la manera en la que se vive diariamente. Ejemplo de ello han sido los terremotos de 1957, 1985 y 2017; por lo que la forma en la que diseñamos las construcciones ha evolucionado a lo largo del tiempo al igual que los reglamentos de construcción.

Por otro lado, las características del terreno varían dependiendo de la zona en la que se encuentre la estructura, lo que significa una variación en la forma en cómo se perciben los sismos y las posibles afectaciones generadas a partir del movimiento.

De acuerdo con la Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo (NTC-Sismo, 2023) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2004), la ciudad se divide en tres zonas sísmicas, las cuáles se clasifican conforme al periodo de vibrar del terreno. A partir de ello se tiene:

- Zona A: con periodo del sitio igual o menor que 0.5 segundos.
- Zona B: con periodo del sitio mayor que 0.5 y menor o igual que 1.0 segundos.
- Zona C: con periodo del sitio mayor que 1.0 segundos.

Independientemente de la zona sísmica, la NTC-Sismo (2023) requiere que la implementación de sistemas de aislamiento sísmico se realice para el nivel de desempeño de Ocupación Inmediata con la intensidad sísmica de diseño denominada Infrecuente. Para esta última, el periodo de retorno que se debe de considerar es mayor o igual a 475 años, que es mayor que los 250 años que se consideran para estructuras convencionales.

En la implementación de dispositivos de aislamiento sísmico, además del periodo del suelo y el de la superestructura, la zonificación geotécnica debe ser considerada como un factor importante. Esto debido a que el comportamiento del sistema puede variar dependiendo de las demandas esperadas (Guerrero et al., 2022).



## **Motivación**

El aislamiento sísmico es una alternativa eficiente para el diseño seguro de sistemas estructurales alrededor del mundo. En nuestro país, específicamente, no existe un registro sobre la cantidad de edificaciones que cuentan con sistemas de aislamiento sísmico, aunque el número aumenta año con año.

Por otro lado, es de suma importancia que se realicen pruebas experimentales en este tipo de sistemas, para poder conocer sus alcances y limitaciones. Esto para que se pueda comprobar la efectividad de su uso en distintos tipos de configuraciones y en condiciones que se puedan presentar debido a la gran diversidad de movimientos sísmicos.

La implementación de estos dispositivos traerá beneficios para la población que hará uso de las edificaciones que cuenten con esa tecnología. Una de las grandes ventajas que esta tecnología ofrece es poder contar con estructuras utilizables inmediatamente después de un evento sísmico severo, lo que se conoce como Ocupación Inmediata. Además de ello, el diseño de las estructuras podrá ser optimizado y se simplificarían diversos procesos constructivos, impactando directamente en tiempos y presupuestos de obra y en la huella ambiental de los proyectos.

## Objetivos

El objetivo general de esta investigación es presentar los resultados de pruebas experimentales en mesa vibradora de una estructura equipada con aisladores sísmicos de tipo deslizante e instrumentada con acelerómetros, para poder comprender su comportamiento y determinar la efectividad del aislamiento sísmico ante movimientos sísmicos severos.

Los objetivos específicos son:

- Comprender los aspectos fundamentales que rigen el comportamiento del aislamiento sísmico.
- Realizar pruebas experimentales en mesa vibradora de la estructura aislada.
- Monitorear la respuesta experimental de la estructura propuesta mediante sensores sísmicos.
- Procesar e interpretar los resultados a partir de las mediciones.
- Realizar conclusiones y recomendaciones de interés sobre el uso de estos dispositivos.

## Alcances

Los alcances definidos para delimitar este trabajo a partir de las metas que se desean alcanzar se describen a continuación:

- Se utilizaron aisladores de tipo deslizante en la estructura ensayada.
- Se formuló un programa de pruebas basado en aceleraciones a partir de diferentes tipos de movimientos y duraciones.
- Se realizaron pruebas en mesa vibradora para determinar el comportamiento estructural inducido por la utilización de aisladores sísmicos de tipo deslizante.
- Se analizaron los resultados obtenidos a partir de las aceleraciones registradas en la estructura y en los aisladores.

# **Organización de la tesis**

Este trabajo está compuesto por una introducción y cuatro capítulos que se describen a continuación. En ellos se describen, de manera general, los alcances y resultados de la investigación.

## **Introducción**

Se presenta una introducción general sobre el problema que representan los movimientos sísmicos y las distintas zonas sísmicas descritas en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2024). Se exploran las principales causas que generan la búsqueda de soluciones ante estas problemáticas, se definen los alcances que se buscan con las pruebas experimentales y los objetivos de esta tesis.

## **Capítulo 1. Aislamiento Sísmico**

Se realiza una descripción sobre los fundamentos teóricos que rigen el comportamiento de los sistemas de aislamiento sísmico, así como una breve descripción de sus distintos tipos y ejemplos de aplicación en diversas zonas de nuestro país y del mundo.

## **Capítulo 2. Pruebas experimentales en mesa vibradora**

Se realiza una descripción de las pruebas experimentales realizadas en mesa vibradora. Se describen también las propiedades de los elementos estructurales que conforman el modelo de pruebas, los movimientos sísmicos utilizados en el programa de pruebas y la instrumentación de la estructura.

## **Capítulo 3. Resultados**

Se realiza la interpretación de los resultados obtenidos a partir de la instrumentación instalada en las diferentes zonas de la estructura, presentando distintos datos y gráficas que muestran el comportamiento de la estructura aislada.

## **Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones**

Para finalizar, en el último capítulo se ofrecen conclusiones y recomendaciones a partir de los resultados obtenidos.

# Capítulo 1. Aislamiento sísmico

## 1.1 Descripción general

Un aislador sísmico es un apoyo que se encuentra ubicado entre la súper estructura y la subestructura. Este transmite cargas verticales y laterales, con la diferencia de que están diseñados para proteger la estructura. Como su nombre lo indica, aislarán a la estructura de posibles afectaciones ocasionadas por movimientos sísmicos, de manera que se reduce la transferencia de movimientos laterales. Además de ello, éstos cuentan con capacidad de recentrado para volver a su posición original después de un sismo (MAGEBA, 2016).

Uno de los primeros antecedentes del aislamiento sísmico se remonta al año de 1870, en el que fue registrada una patente por Jules Touaillon, que consistía en la utilización de un sistema constructivo capaz de aislar los movimientos de los terremotos de las estructuras. Para ello, se usaban placas cuya superficie era cóncava y contenía esferas entre ellas. Estas últimas con un radio menor. Este método era posible debido a que la gravedad ocasionaba que se volvieran a colocar en su posición inicial después de un movimiento sísmico (Makris, 2019).

En nuestro país, el ingeniero Manuel González Flores inventó un sistema que él llamó “antisísmico”, el cual consistía en dos placas circulares con una terminación en espejo, entre las dos placas se situaban esferas de acero, las cuáles se encontraban rodeadas por un anillo de acero, la placa inferior estaba sujeta a la cimentación, mientras que la de arriba estaba sujeta a la estructura. En la Ciudad de México este sistema fue instalado en un edificio ubicado en la Av. Repúblicas No. 74 de la colonia Portales y en una escuela en la calle Ximilpa de la colonia Nueva Argentina (SMIG, 2024).

De acuerdo con Kelly et al. (2010), es de suma importancia la consideración de la implementación de sistemas de aislamiento sísmico de acuerdo con el tipo de movimientos sísmicos a los que estará expuesta cada estructura. Dichos movimientos sísmicos están directamente relacionados con las condiciones geológicas de la zona, el tipo de suelo y las características de las ondas sísmicas que se presentan.

De igual manera, Kelly et al. (2010) mencionan que las estructuras que no cuentan con un sistema de aislamiento sísmico registran aceleraciones mayores en la estructura que en el suelo, por lo que al utilizar este tipo de dispositivos se busca reducir los efectos que puedan ser presentados debido a movimientos sísmicos.

## 1.2 Principios fundamentales

Mencionan Kelly et al. (2010) que el objetivo principal del uso de sistemas de aislamiento sísmico es desligar a la estructura de los efectos presentados en el suelo debido a movimientos sísmicos, con ello se busca reducir en gran medida la transmisión de las fuerzas generadas en el subsuelo y la energía que se pueda presentar en la estructura. Los sistemas de aislamiento sísmico buscan proporcionar flexibilidad horizontal a los apoyos de los sistemas estructurales, de modo que se disminuyan las demandas sísmicas y, en consecuencia, los daños tanto en los elementos estructurales como en los elementos no estructurales. Gracias a los sistemas de aislamiento sísmico, es posible que las estructuras puedan tener un nivel de desempeño de Ocupación Inmediata posteriormente a la ocurrencia de un movimiento sísmico.

Al momento de que se implementa un sistema de aislamiento sísmico en la base de una estructura, su periodo fundamental aumenta. Ello ocasiona que los desplazamientos en la estructura se incrementen en la zona donde se ubican estos dispositivos y las demandas de pseudo-aceleración disminuyan. Por otro lado, se debe tener cuidado al utilizar un sistema de aislamiento sísmico en estructuras que se encuentran ubicadas en suelos blandos, pues el sistema estructural podría entrar en resonancia, si el periodo del suelo se acerca al periodo fundamental de la estructura; este fenómeno implicaría mayores demandas de pseudo-aceleración y grandes desplazamientos. Es de suma importancia entonces diseñar los sistemas de aislamiento sísmico con la flexibilidad necesaria para evitar estas situaciones, preferentemente, alejando el periodo de la estructura lo máximo posible de la zona de resonancia (Guerrero et al., 2022).

De manera general, se puede mencionar que el principio fundamental de la implementación de sistemas de aislamiento sísmico consiste en mejorar el comportamiento de los sistemas estructurales. Esto mediante el aumento del periodo fundamental, generando una disminución de las demandas sísmicas en el sistema.

## 1.3 Tipos de aisladores

En esta sección se presenta una breve descripción de los tipos de aisladores sísmicos principales. Esto incluye: apoyos de neopreno laminado, apoyos de neopreno con núcleo de plomo y sistema de péndulo de fricción (Christopoulos y Filiatraut, 2006).

### Apoyos de neopreno laminado

Los apoyos de neopreno laminado (Figura 2) son utilizados mayormente en estructuras como puentes, esto se debe a que este tipo de sistema de aislamiento permite las demandas de desplazamientos y las deformaciones ocasionadas por la temperatura. Este apoyo está formado por la unión de capas de acero y capas de neopreno de forma alternada. Ello se realiza debido a una unión bajo condiciones de presión y temperatura. El neopreno utilizado es de tipo elastomérico. Debido al tipo de apoyo se puede disminuir el espesor de las capas de neopreno utilizadas y brindar una mayor capacidad de carga gravitacional. La aportación que brindan las capas de acero utilizadas en estos apoyos es una mayor rigidez vertical, así como un confinamiento que impide la expansión lateral que puede ser producida en las capas de neopreno cuando este se somete a compresión, de igual manera, también proporcionan una mayor estabilidad en apoyos más grandes ante la presencia cargas laterales. Para este tipo de sistemas su rigidez lateral está relacionada con la altura de cada dispositivo y el área de cada capa de neopreno que contenga el apoyo. Los factores que se deben de tomar en cuenta para el diseño de este tipo de aisladores son la capacidad de carga gravitacional, la rigidez lateral y el desplazamiento máximo relativo que existirá dentro del apoyo. Una de las desventajas con las que cuentan este tipo de sistemas de aislamiento son los bajos niveles de amortiguamiento que puede proporcionar a la estructura.

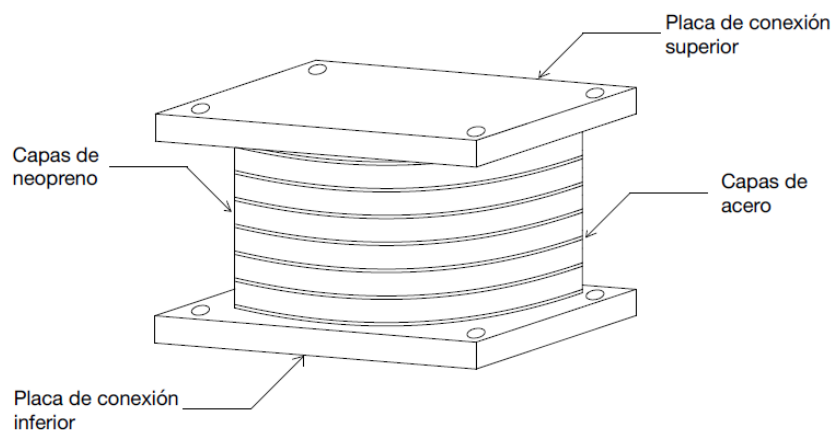


Figura 2. Aislador sísmico de apoyo de neopreno laminado.

### Apoyos de neopreno con núcleo de plomo

El sistema de aislamiento de apoyo de neopreno con núcleo de plomo (Figura 3) tiene un principio de funcionamiento similar a los apoyos de neopreno laminado. La diferencia entre estos dos sistemas radica en que el apoyo de neopreno con núcleo de plomo cuenta con un núcleo central en forma de cilindro que está hecho de plomo.

Al añadir este material al centro del apoyo se le proporciona mayor rigidez, resistencia y amortiguamiento al aislador, además de tener buena resistencia por fatiga. Al momento de que se encuentra a temperatura ambiente las propiedades del plomo son similares a las de un material elasto – plástico y no se necesitan grandes esfuerzos para que pueda fluir ante una fuerza cortante, por lo que sus propiedades se van restableciendo de manera continua en el rango inelástico del material.

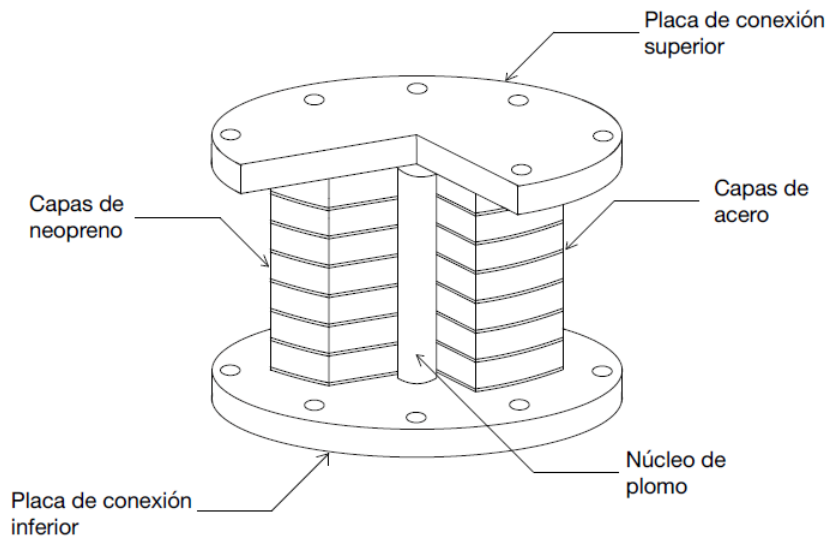


Figura 3. Aislador sísmico de apoyo de neopreno con núcleo de plomo.

### Sistema de péndulo de fricción

Los sistemas de aislamiento de péndulo de fricción (Figura 4) también son conocidos como aisladores de tipo deslizante. Estos dispositivos consisten en una o más superficies cóncavas esféricas de acero entre las cuáles se coloca un deslizador, de modo que se empiece a deslizar ante la presencia de movimientos laterales como los producidos por sismos. El principio fundamental de este tipo de aisladores es utilizar la fuerza gravitacional para que el sistema de aislamiento se restaure y vuelva a su posición original después de un deslizamiento.

Al momento de que el sistema es perturbado debido a una fuerza lateral inducida el sistema dejará de ser prácticamente rígido. La rigidez efectiva de este tipo de sistema, a diferencia de

los apoyos de neopreno laminado o los apoyos de neopreno con núcleo de plomo, depende directamente del coeficiente de fricción de las superficies cóncavas esféricas, del radio de curvatura y del desplazamiento máximo al que estará sometida la estructura.

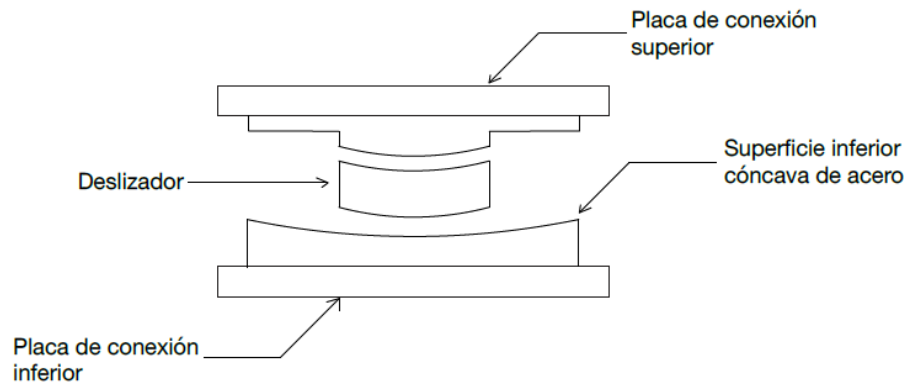
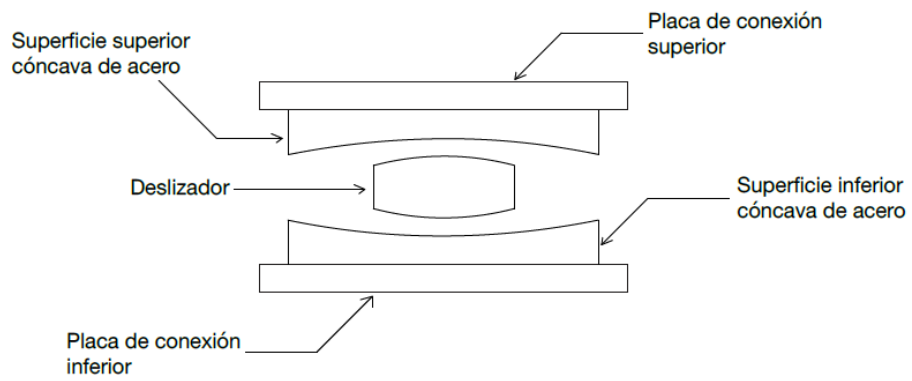


Figura 4. Aislador sísmico de péndulo de fricción con curvatura simple.

Existen sistemas de aislamiento de curvatura simple o doble. Esta última es una gran alternativa utilizada en diversos proyectos. Cuenta con dos superficies cóncavas esféricas, donde cada una de estas superficies puede tener coeficientes de fricción diferentes. Ambas superficies cóncavas están unidas mediante un deslizador, que será capaz de deslizarse por ambas superficies.

Para los sistemas en los que se cuente con la variante de curvatura doble (ver Figura 5), el deslizamiento iniciará en aquella superficie que tenga un coeficiente de fricción menor y, posteriormente a esto, el movimiento continuará en la superficie con el mayor coeficiente; cuando el desplazamiento esté presente en ambas superficies, se aumentará la distancia a la cual se puede desplazar el sistema de aislamiento utilizado. En aquellos casos en los que el coeficiente de fricción sea el mismo para cada una de las superficies cóncavas, el movimiento se iniciará en la superficie inferior y una vez que se haya alcanzado la resistencia a la fricción de la superficie cóncava superior, esta iniciará su movimiento.



*Figura 5. Aislador sísmico de péndulo de fricción con curvatura doble.*

## 1.4 Aplicaciones

Alrededor del mundo se han realizado diversas estructuras equipadas con sistemas de aislamiento sísmico, de modo que puedan ser protegidas frente a movimientos severos. Algunos ejemplos de ellos se describen a continuación.

**Apple Park (Estados Unidos de América)** ubicado en Cupertino, California. Esta estructura fue inaugurada en el año 2017 y consiste en un edificio de oficinas construido con concreto prefabricado y preesforzado; es considerado el edificio aislado más grande del mundo, su sistema de aislamiento sísmico está integrado por 692 aisladores de tipo deslizante. Además, el desplazamiento que pueden llegar a desarrollar dichos aisladores es de 1.32 metros (SEAONC, 2023).

**Tren Interurbano México-Toluca (México)** es una obra de transporte público que conecta a la Ciudad de México con la ciudad de Toluca, ubicada en el Estado de México. Específicamente el Viaducto 2 tiene una longitud de 3,865 metros y está dividido en 5 tramos continuos. Esta estructura está hecha por medio de vigas en cajón con concreto preesforzado y fue usado un sistema de cimbra deslizante. Para llevar a cabo este proyecto se utilizaron aisladores de apoyo de neopreno laminado y aisladores de tipo deslizante. Estos sistemas funcionan como un sistema de recentrado (Benicke et al., 2019).

**Eskisehir City Hospital (Turquía)** es un hospital ubicado en el distrito de Eskisehir que se encuentra a 250 km al sur este de Estambul. Después de realizar los estudios correspondientes se determinó que el tipo de aislador requerido para esta obra eran los aisladores de péndulo de fricción con curvatura doble. Este hospital está dividido en cuatro bloques, cada uno de ellos cuenta con su sistema de aisladores, los cuáles son 561 en el bloque A, 216 en el bloque B, 100 en el bloque C y 100 en el bloque D (Benicke et al., 2019).

**Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles – AIFA (México)** ubicado en Santa Lucía, Estado de México. El proyecto terminado cuenta con la instalación de 1332 aisladores sísmicos de péndulo de fricción de doble curvatura. Los aisladores pueden alcanzar un desplazamiento máximo de 300 milímetros. Es considerada la estructura aislada más grande de Latino América (MAURER, 2021a).

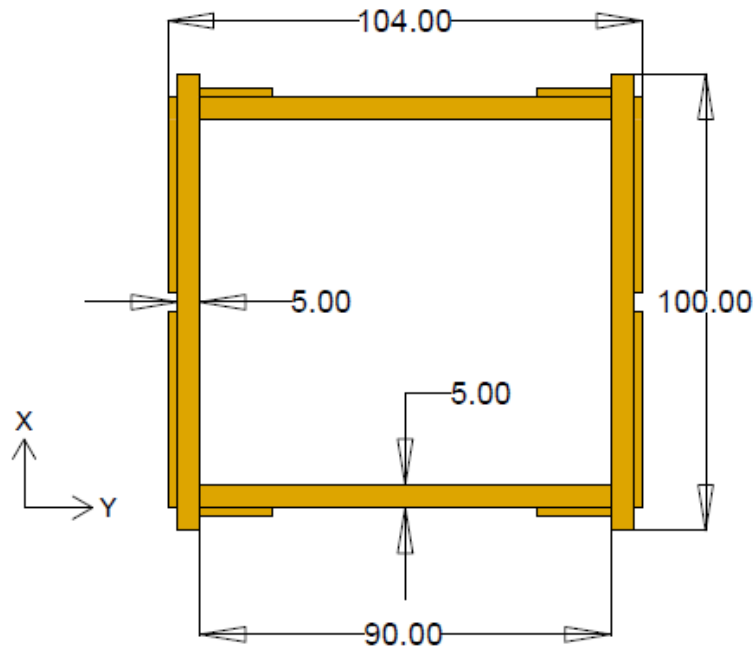
**Hospital General del ISSSTE – Tláhuac (México)** ubicado en la alcaldía de Tláhuac, en la Ciudad de México. Fue el primer hospital en la ciudad con un sistema de aislamiento sísmico. Los aisladores se colocaron sobre una base de concreto y sobre estos también se colocó una plataforma de concreto sobre la cuál se construyó el hospital. Se colocó un total de 243 aisladores sísmico, de los cuales 232 fueron de neopreno con núcleo de plomo con diámetros de 850 y 600 milímetros, y 11 de ellos fueron aisladores con apoyo esférico. Sus aisladores fueron diseñados para tener desplazamientos máximos de 400 milímetros (MAURER, 2021b).

**Torre de hospitalización del Instituto Salvador Zubirán (México)** ubicado en la alcaldía de Tlalpan, Ciudad de México, es el primer hospital en la Ciudad de México al cuál se le implementó un sistema de aislamiento sísmico con aisladores de tipo deslizante. Dichos dispositivos fueron proporcionados por la empresa alemana MAURER y su tipo fue un aislador pendular de tipo deslizante adaptativo, su desplazamiento máximo horizontal es de 300 milímetros. La placa inferior proporciona un desplazamiento de 12 centímetros y la placa superior un desplazamiento de 18 centímetros (Abud, 2022).

## Capítulo 2. Pruebas experimentales en mesa vibradora

### 2.1 Descripción del modelo

El modelo aislado utilizado para la realización de las pruebas experimentales fue una estructura fabricada por elementos de madera. Dichos elementos fueron colocados en un arreglo tridimensional. Las dimensiones de la sección transversal de dichos elementos son de 6 centímetros de altura y 5 centímetros de ancho. La estructura armada tiene unas dimensiones totales de 104 centímetros de ancho, 100 centímetros de profundidad y 112 centímetros de altura. En las Figuras 6 a 8, se pueden observar las dimensiones de la estructura estudiada.



Cotas en centímetros

Figura 6. Croquis de vista en planta de la estructura, plano XY

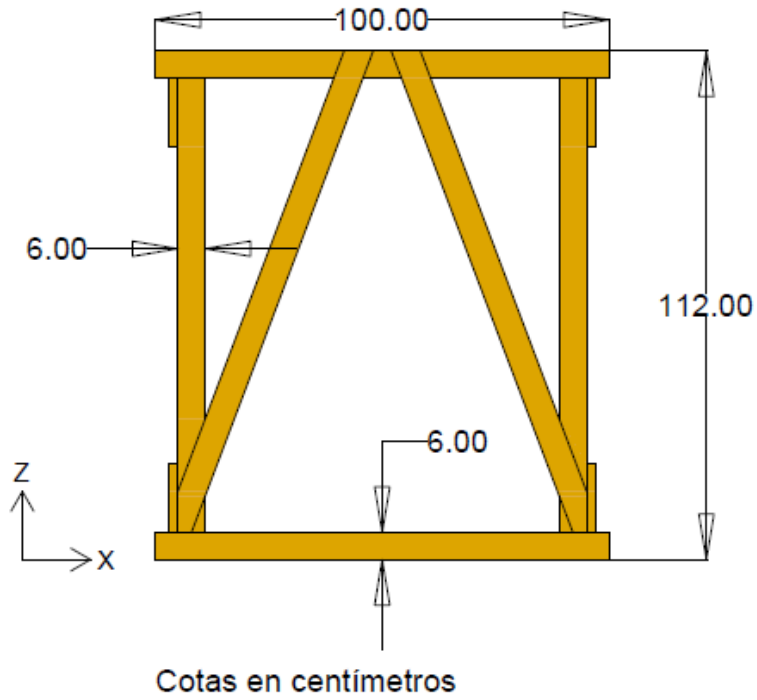


Figura 7. Croquis de vista de perfil de la estructura, plano XZ.

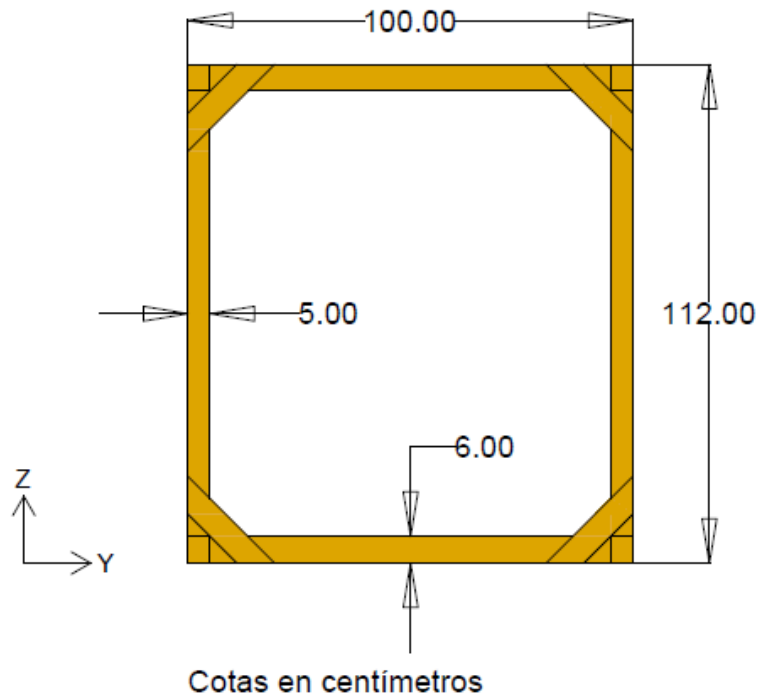


Figura 8. Croquis de vista de perfil de la estructura, plano YZ.

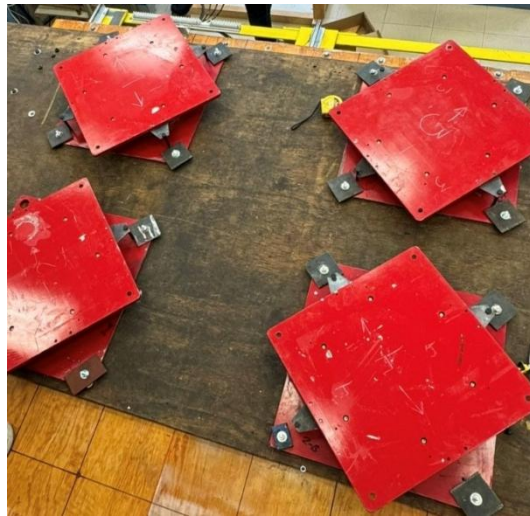
En la Figura 9 se muestra una fotografía realizada durante el armado de la estructura dentro del laboratorio.



*Figura 9. Armado de la estructura.*

## 2.2 Configuración del experimento

La estructura, a la cual se le realizaron las pruebas experimentales, fue equipada con cuatro aisladores sísmicos (mostrados en las Figuras 10 y 11). Dichos aisladores son de tipo deslizante de péndulo simple (o curvatura simple), con un radio de curvatura de 4 metros y un diámetro del plato de 38 centímetros. Cada uno de ellos fue colocado en una esquina diferente de la base de la estructura.



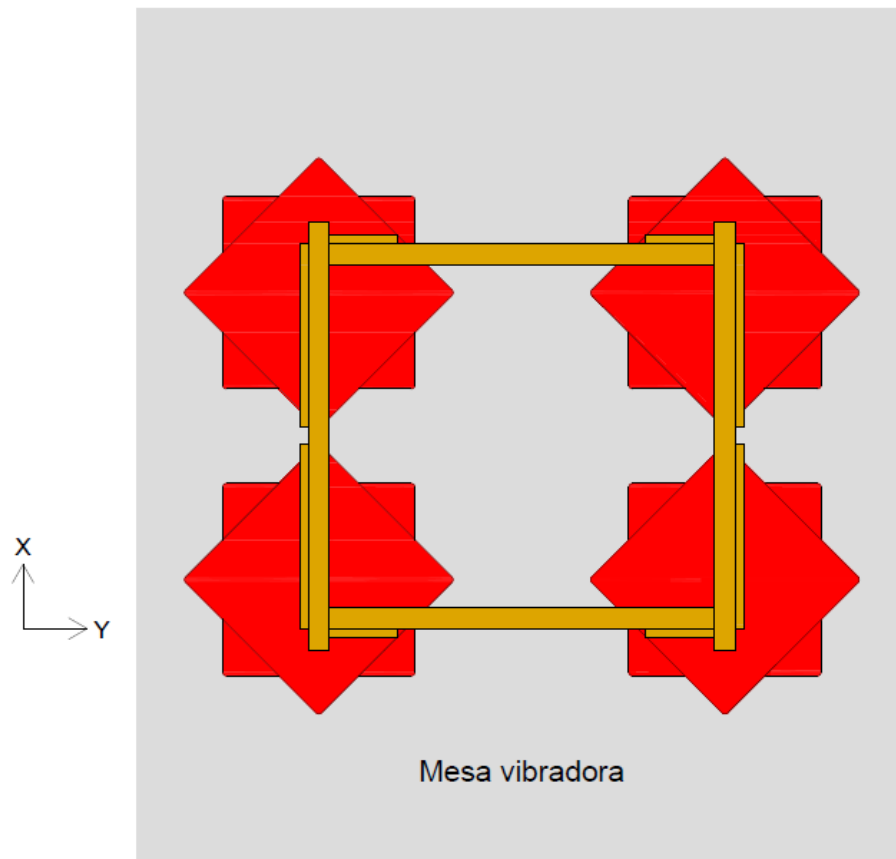
*Figura 10. Aisladores sísmicos instalados en mesa vibradora.*



*Figura 11. Articulación colocada entre placas de aislador sísmico.*

En la Figura 12 se muestra la ubicación en la que fue colocado cada dispositivo de aislamiento sísmico utilizado.

Debido a las características de la mesa vibradora, las pruebas experimentales se realizaron en una sola dirección horizontal de movimiento, nombrada dirección  $X$ , como se muestra en el croquis correspondiente de la vista en planta del plano  $XY$  de la Figura 12.



*Figura 12. Croquis de vista en planta de estructura aislada, plano  $XY$ .*

En la Figura 13 se muestra una fotografía del modelo de la estructura aislada instalada en la mesa vibradora del laboratorio.



*Figura 13. Estructura aislada en mesa vibradora.*

## 2.3 Programa de pruebas

El programa de pruebas utilizado para realizar este experimento consistió en cuatro movimientos aplicados: una prueba de ruido blanco, un movimiento armónico senoidal, el movimiento sísmico CH84, componente Este – Oeste, del 19 de septiembre de 2017, y el movimiento sísmico SCT, componente Este – Oeste, del 19 de septiembre de 1985.

Para el caso del movimiento CH84, este se aplicó al 100%. Esta estación pertenece a la Red Acelerográfica de la Ciudad de México (RACM), más particularmente a la red del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C. (CIRES), y se encuentra ubicada en la Escuela Primaria “Ing. José López Portillo y Weber” de la colonia Ex – Ejido de San Francisco Culhuacán, Coyoacán, Ciudad de México (CIRES, 2026).

Mientras que el movimiento sísmico registrado en la estación SCT se escaló al 75% debido a las capacidades de la mesa vibradora utilizada. Este movimiento pertenece al sismo registrado el 19 de septiembre de 1985. Dicha estación estuvo ubicada en la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte, sus trabajos de instalación concluyeron en el año de 1984, en el que era el centro de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas (SCOP) en la colonia Narvarte Oriente, Benito Juárez, Ciudad de México (Ramírez, y otros, 2024).

Cabe aclarar que los movimientos sísmicos utilizados (CH84 y SCT) fueron registrados en suelo blando.

Cada uno de estos movimientos se describen en la Tabla 1, junto con el orden de realización de las pruebas y su duración correspondiente.

*Tabla 1. Programa de pruebas utilizado.*

<b>Prueba</b>	<b>Descripción</b>	<b>Duración</b>
<b>1</b>	Ruido blanco RMS 200 Gal	60 segundos
<b>2</b>	Senoidal, Frecuencia 2.0 Hz, Amplitud 75 mm	60 segundos
<b>3</b>	Estación CH84 100%	110 segundos
<b>4</b>	Estación SCT 75%	185 segundos

## 2.4 Instrumentación

La instrumentación de la estructura aislada consistió en la colocación estratégica de nueve acelerómetros distribuidos en diferentes ubicaciones. En el croquis presentado en la Figura 14 se puede observar que dos aisladores (CH01 y CH03) fueron ubicados sobre la placa del aislador fijada en la mesa vibradora, cuatro (CH02, CH04, CH07 y CH08) sobre la placa fijada a la estructura y tres (CH05, CH06 y CH09) ubicados en la cima de la estructura.

Los acelerómetros utilizados para la realización de las pruebas experimentales fueron unidireccionales, de los nueve utilizados, los acelerómetros CH01, CH02, CH03, CH04, CH05, CH06 y CH07 se colocaron en dirección del movimiento de la mesa vibradora, la cual se denominó dirección  $X$ , mientras que los acelerómetros CH08 y CH09 se colocaron perpendiculares al movimiento, es decir, dirección  $Y$ .

En las Figuras 14 a 16 se muestran los croquis realizados en cada uno de los diferentes planos ( $XY$ ,  $XZ$  y  $YZ$ ), con la ubicación de cada uno de los acelerómetros instalados en la estructura aislada.

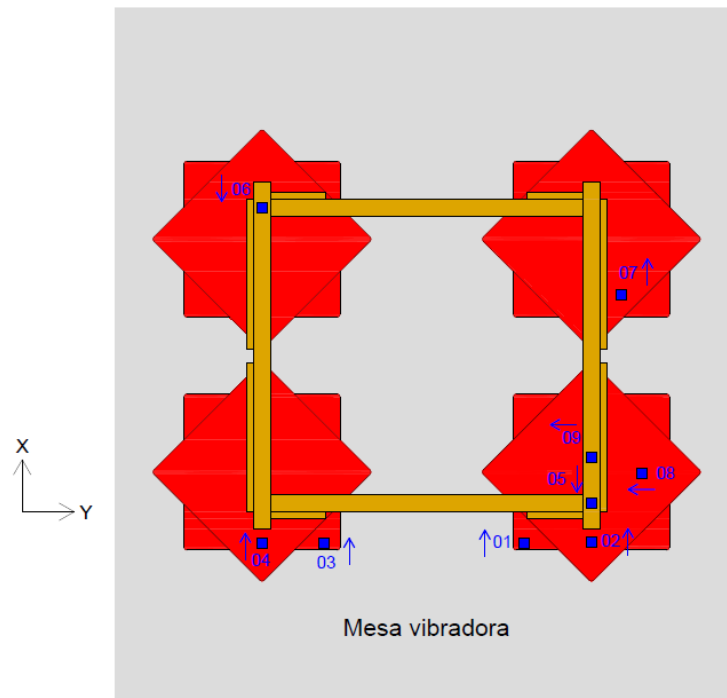


Figura 14. Croquis de vista en planta de estructura aislada instrumentada en mesa vibradora, plano XY.

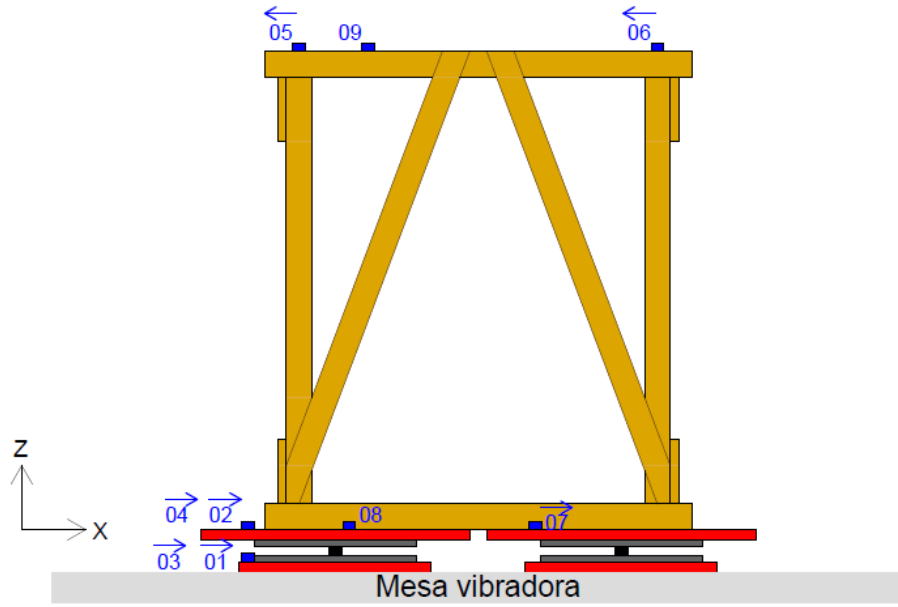


Figura 15. Croquis de vista en planta de estructura aislada instrumentada en mesa vibradora, plano XZ.

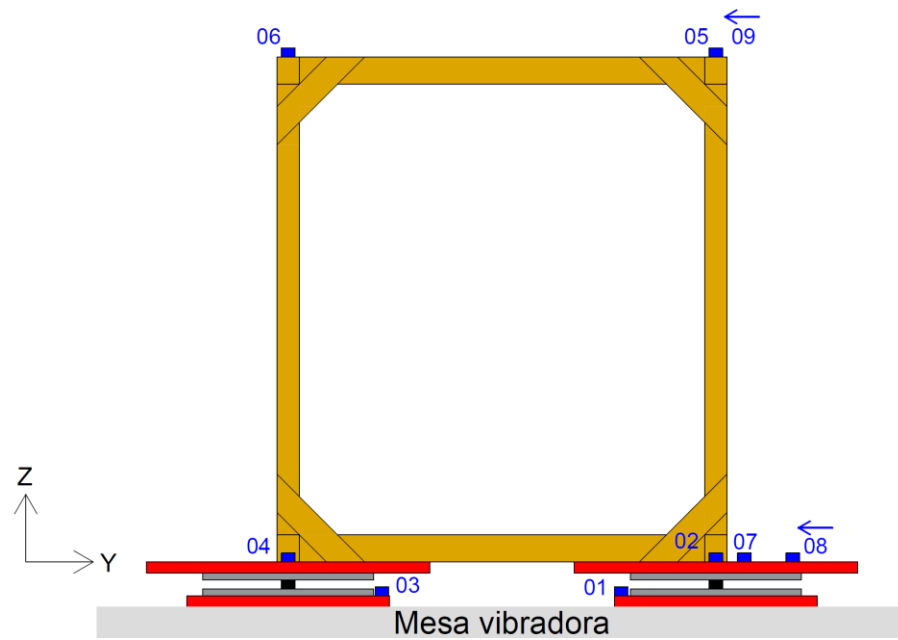


Figura 16. Croquis de vista en planta de estructura aislada instrumentada en mesa vibradora, plano YZ.

En las Figuras 17 a 20 se pueden apreciar algunos de los acelerómetros instalados en los diferentes aisladores y en la estructura.



Figura 17. Vista en planta de acelerómetros CH01 y CH02.

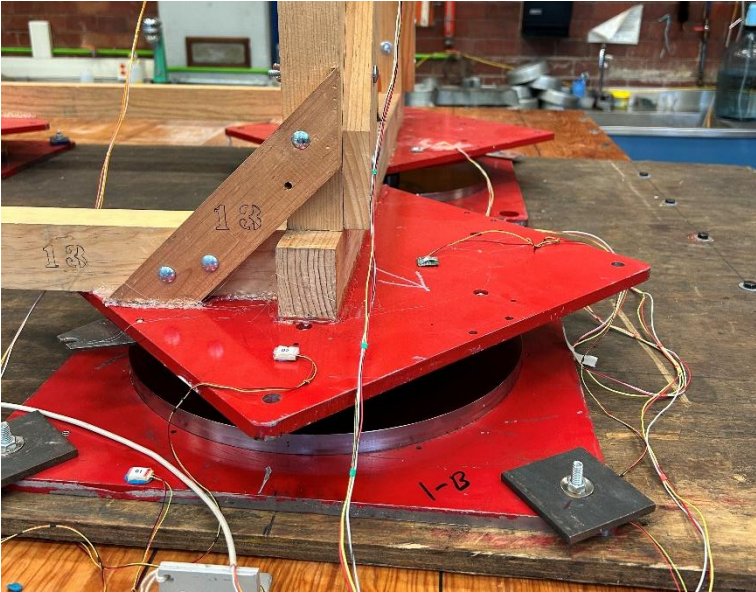
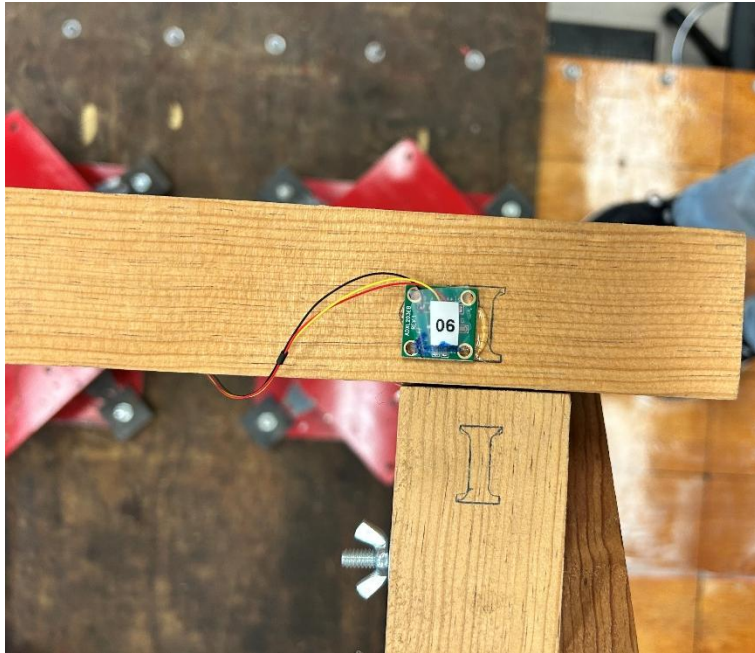
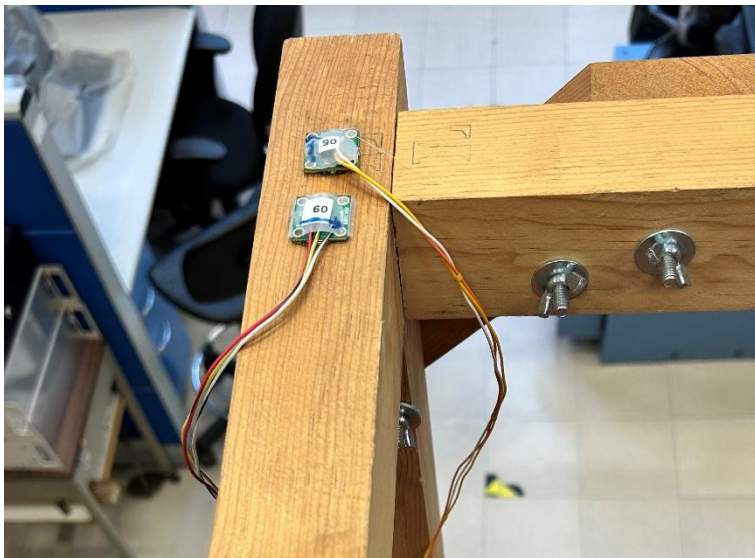


Figura 18. Acelerómetros CH01, CH02, CH07 y CH08.



*Figura 19. Vista en planta de acelerómetro CH06.*



*Figura 20. Vista en planta de acelerómetros de CH05 y CH09.*

## Capítulo 3. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos registrados por los acelerómetros CH01, CH02 y CH05. Estos resultados se obtuvieron mediante las pruebas experimentales mencionadas anteriormente en el programa de pruebas. Por practicidad, estos acelerómetros fueron ubicados en un mismo plano en la estructura. Con ello se buscó minimizar posibles incongruencias que se pudieran generar debido a efectos secundarios generados en la estructura, como lo pueden ser los efectos de torsión.

### 3.1 Aceleraciones medidas

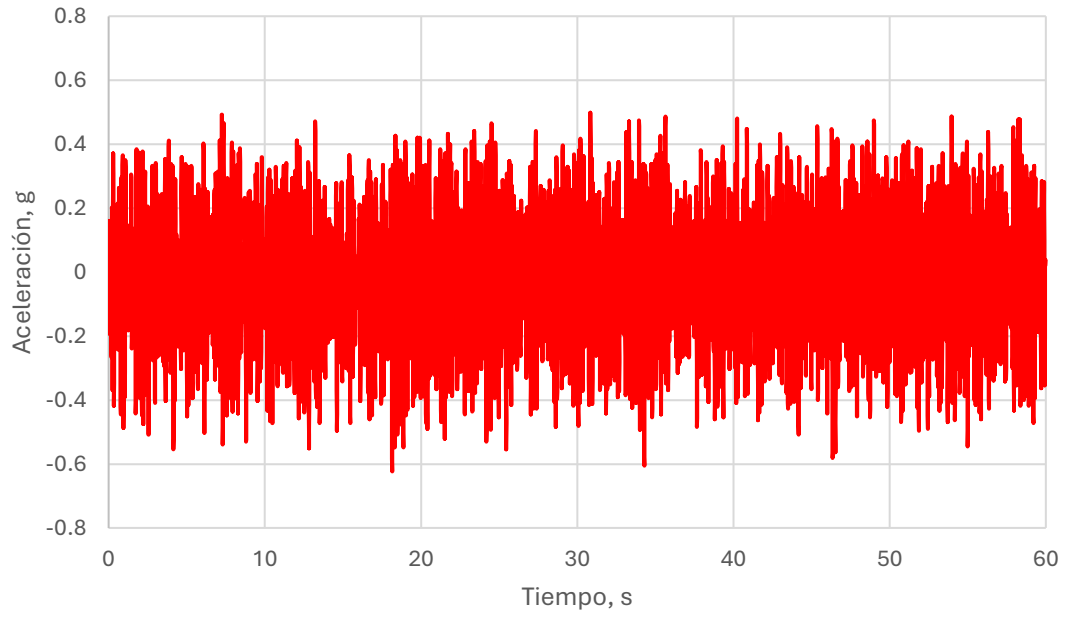
En esta sección se presentan las aceleraciones obtenidas por medio de los acelerómetros instalados en el modelo aislado. Dichos resultados se presentan normalizados con respecto a la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).

Las gráficas presentadas muestran en su eje vertical la aceleración registrada y en el eje horizontal el tiempo.

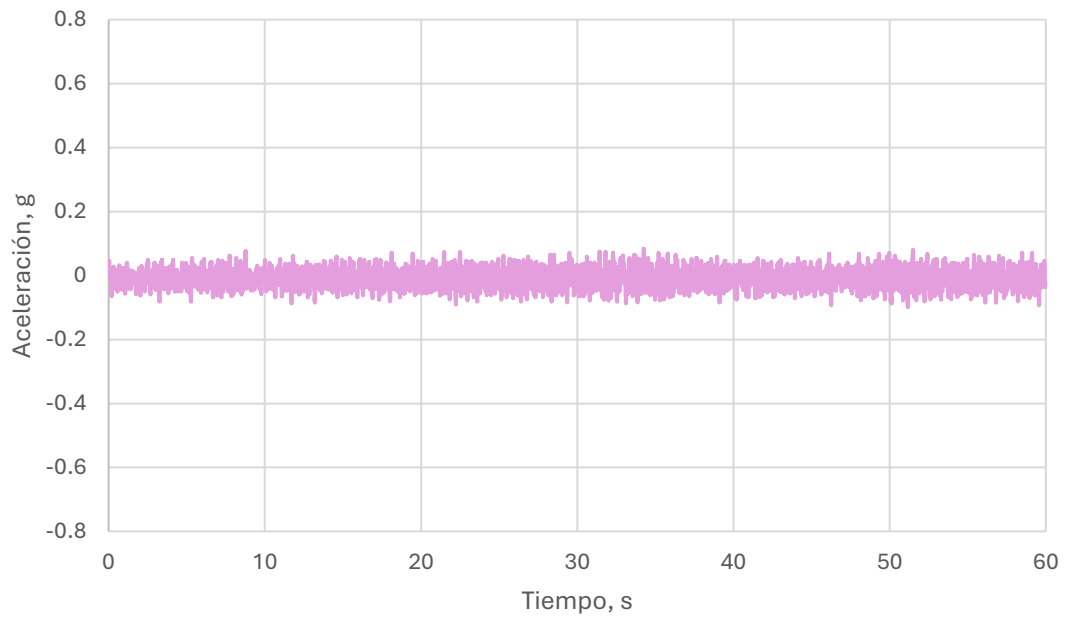
#### 3.1.1 Ruido blanco

En las Figuras 21 a 23 se muestran las gráficas de las aceleraciones obtenidas en la mesa vibradora, el aislador sísmico y la cima de la estructura, respectivamente. Para esta primera prueba experimental, se utilizó un ruido blanco RMS de 200 Gal ( $\text{cm/s}^2$ ), con una duración de 60 segundos.

Con respecto a la mesa vibradora, se puede determinar que la aceleración máxima registrada fue de 0.62 g (Figura 21). Para la gráfica correspondiente a la aceleración registrada en el aislador sísmico, su aceleración máxima fue de 0.099 g (Figura 22). Y finalmente, para la cima del modelo, el valor máximo de la aceleración fue de 0.26 g (Figura 23).



*Figura 21. Registro de aceleraciones de CH01. Ruido blanco.*



*Figura 22. Registro de aceleraciones de CH02. Ruido blanco.*

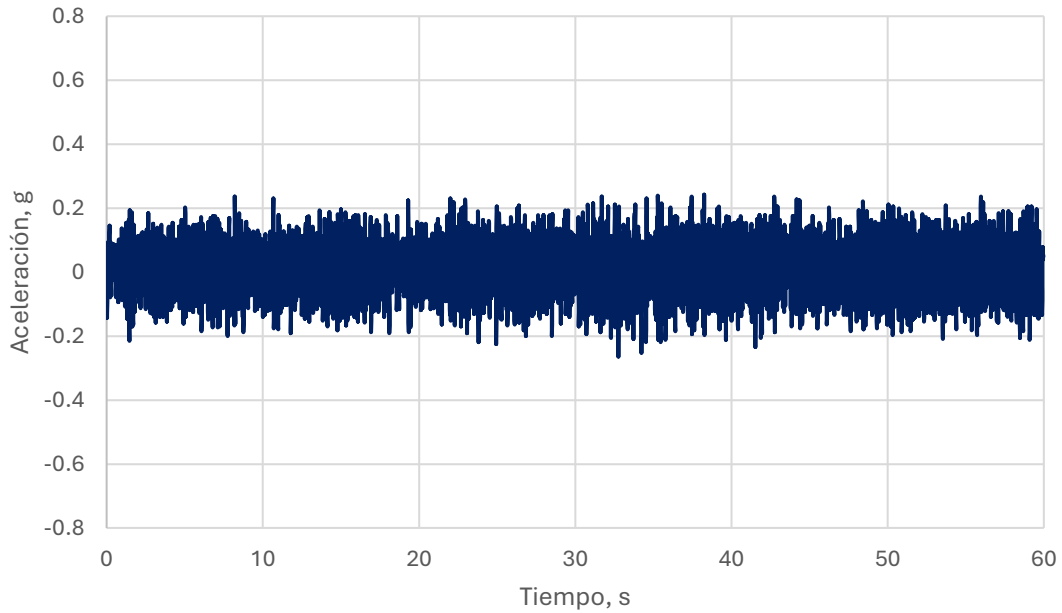


Figura 23. Registro de aceleraciones de CH05. Ruido blanco.

En la Figura 24 se muestra una comparación entre las aceleraciones registradas sobre la mesa vibradora y sobre el aislador sísmico, de modo que se pueda visualizar la efectividad del uso de este tipo de dispositivos ante un movimiento sísmico de ruido blanco.

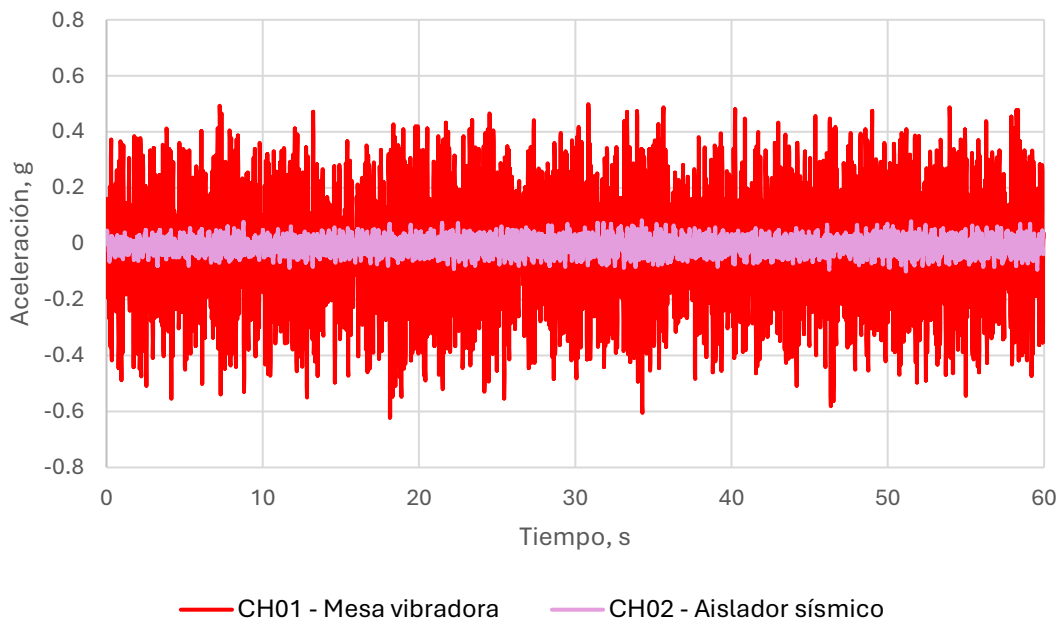


Figura 24. Comparación de aceleraciones en mesa vibradora y aislador sísmico. Ruido blanco.

Gracias a la Figura 24 se pueden apreciar reducciones significativas en las aceleraciones registradas en el aislador sísmico en comparación a las obtenidas en la mesa vibradora, siendo las primeras aproximadamente el 16% de las últimas.

De igual manera, se realizó la comparación de las aceleraciones obtenidas sobre el aislador sísmico y en la cima de la estructura, como se puede observar en la Figura 25. Con este resultado se puede apreciar un aumento en las aceleraciones del 166% en la cima de la estructura.

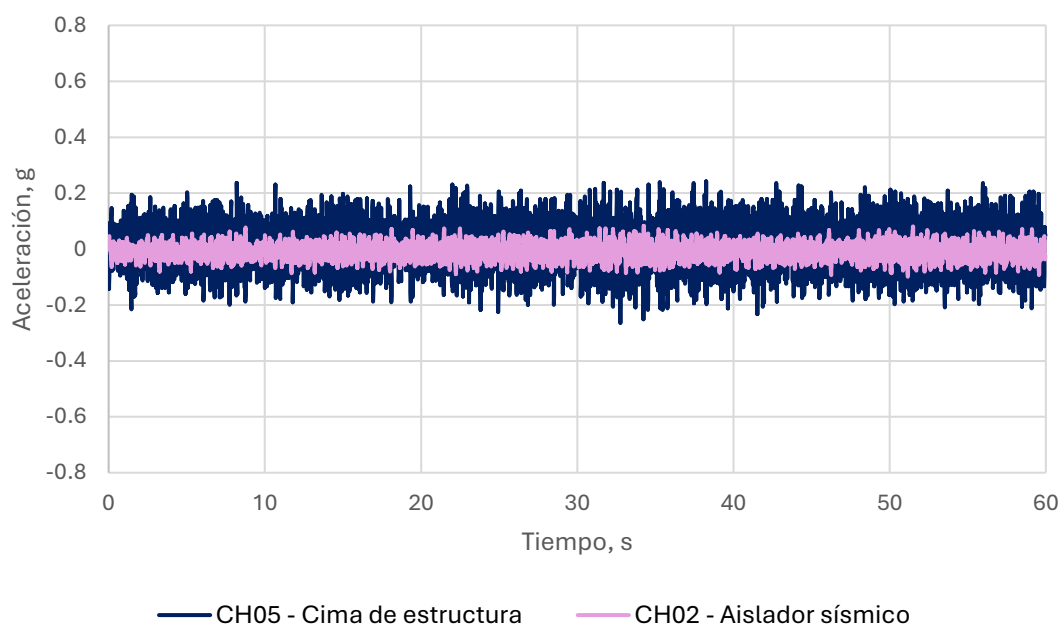


Figura 25. Comparación de aceleraciones en aislador sísmico y cima de estructura. Ruido blanco.

### 3.1.2 Movimiento senoidal

Como segunda prueba se aplicó un movimiento sísmico de tipo senoidal. Dicho movimiento tuvo una frecuencia de 2 Hz y una amplitud de 75 mm. La duración de este movimiento fue de 60 s, al igual que el primer movimiento del programa de pruebas. En el anexo A, se muestran los resultados individuales obtenidos ante este movimiento. En esta sección se presentan los resultados en la mesa vibradora, el aislador sísmico y la cima de la estructura, comparadas en la Figura 26.

Las aceleraciones máximas obtenidas en cada uno de los acelerómetros fueron de 1.02 g en la mesa vibradora, de 0.15 g en el aislador sísmico y de 0.22 g en la cima de la estructura.

Al igual que en el caso de la primera prueba, se realizó una comparación de los resultados obtenidos en la mesa vibradora y en el aislador sísmico, de modo que se compruebe la reducción en las aceleraciones registradas. Dicha comparación se muestra en la gráfica de la Figura 26.

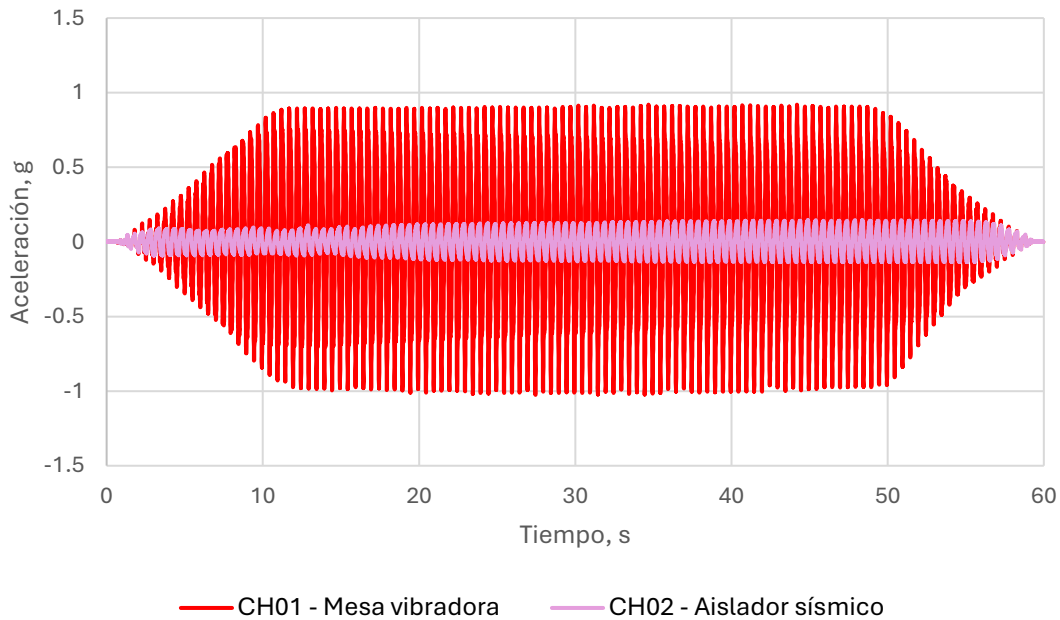


Figura 26. Comparación de aceleraciones en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento senoidal.

Para el caso de la prueba con el movimiento Senoidal, la disminución de las aceleraciones máximas entre la mesa vibradora y el aislador sísmico es similar a la prueba con el movimiento de Ruido blanco. Para esta segunda prueba, la aceleración disminuyó a un 14% en el aislador con respecto a la mesa.

En la Figura 27 se comparan las aceleraciones registradas en la cima de la estructura y las del aislador sísmico. El aumento en las aceleraciones para la cima de la estructura corresponde a un 49.9% con respecto a las aceleraciones registradas por el acelerómetro ubicado en el aislador sísmico.

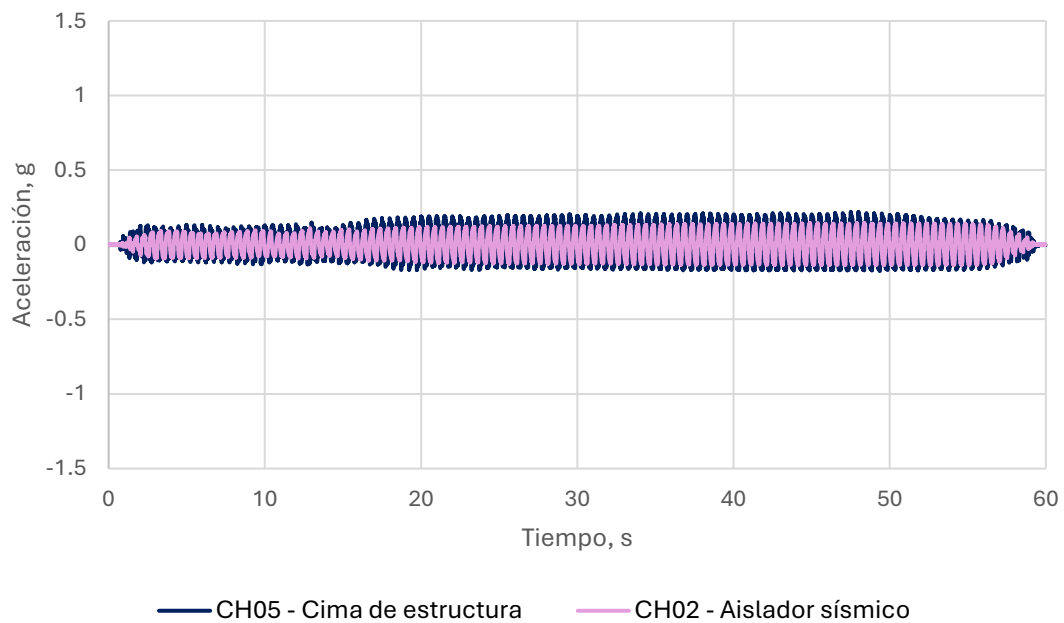


Figura 27. Comparación de aceleraciones en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento senoidal.

### 3.1.3 Movimiento sísmico CH84

En la tercera prueba experimental realizada se utilizaron las aceleraciones registradas el 19 de septiembre de 2017 por la estación CH84, componente Este – Oeste, al 100% (sin escalar), dicha estación está ubicada en la alcaldía Coyoacán, de la Ciudad de México.

Las gráficas de las aceleraciones obtenidas en este apartado se pueden consultar en el anexo A de manera individual para la mesa vibradora, el aislador sísmico y la cima de la estructura respectivamente. Las aceleraciones máximas presentadas en dichas gráficas son de 0.26 g (mesa vibradora), 0.096 g (aislador sísmico) y de 0.12 g (cima de la estructura).

Para el caso de esta prueba experimental, siendo la primera con un registro sísmico, se realizó la comparación de las aceleraciones registradas por la instrumentación colocada en las diferentes zonas de la estructura, obteniendo una reducción en los valores de aceleración del 63% en la parte superior del aislador sísmico en comparación con la mesa vibradora (Figura 28).

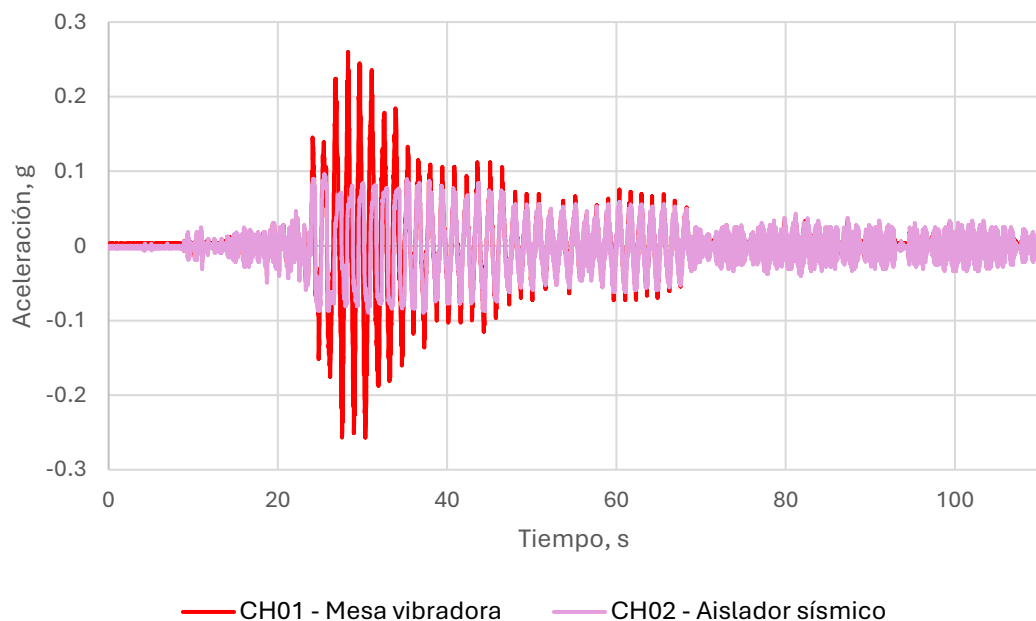


Figura 28. Comparación de aceleraciones en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento sísmico CH84.

Al analizar la comparación de la Figura 28, se demuestra una mayor efectividad en cuanto al uso de los dispositivos de aislamiento sísmico en un evento sísmico. Las aceleraciones pico se vieron reducidas de manera significativa y no superaron 0.10 g.

En la Figura 29 se puede observar la comparación entre las aceleraciones obtenidas en la parte superior del aislador sísmico y la cima de la estructura, siendo estas últimas aumentadas en un 19.9% de la aceleración máxima registrada en el aislador sísmico.

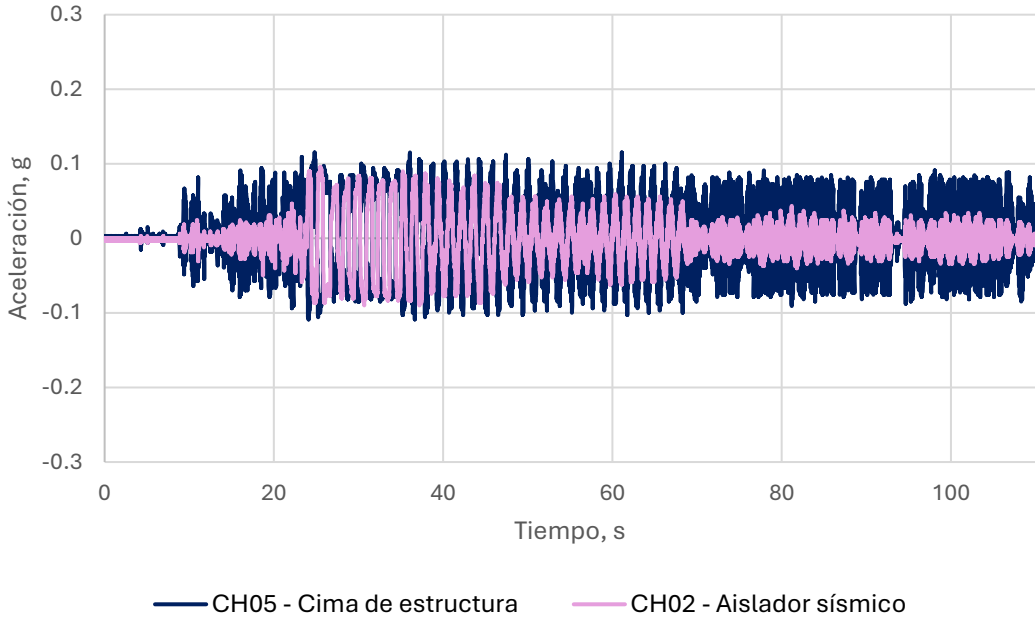


Figura 29. Comparación de aceleraciones en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento sísmico CH84.

### 3.1.4 Movimiento sísmico SCT

En la cuarta prueba experimental realizada se utilizó el movimiento sísmico de la estación SCT, componente Este – Oeste, escalado al 75%. Este movimiento es el corresponde al sismo registrado el 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México. De igual manera, como en las pruebas experimentales anteriores, se realizó un registro de las aceleraciones en la mesa vibradora, sobre el aislador sísmico y en la cima de la estructura. Las gráficas de las aceleraciones obtenidas se presentan en el anexo A de manera individual.

Se registraron aceleraciones máximas en la mesa vibradora de 0.17 g, en el aislador sísmico de 0.099 g y en la cima de la estructura de 0.115 g.

En la Figura 30 se presenta la comparación entre las aceleraciones registradas en la mesa vibradora y el aislador sísmico. Se puede observar que las aceleraciones máximas registradas en la mesa vibradora fueron notoriamente reducidas en un 43% al llegar al acelerómetro ubicado sobre el aislador sísmico. De manera similar a la prueba experimental anterior (CH84 al 100%), la aceleración máxima arriba del sistema de aislamiento no superó 0.10 g.

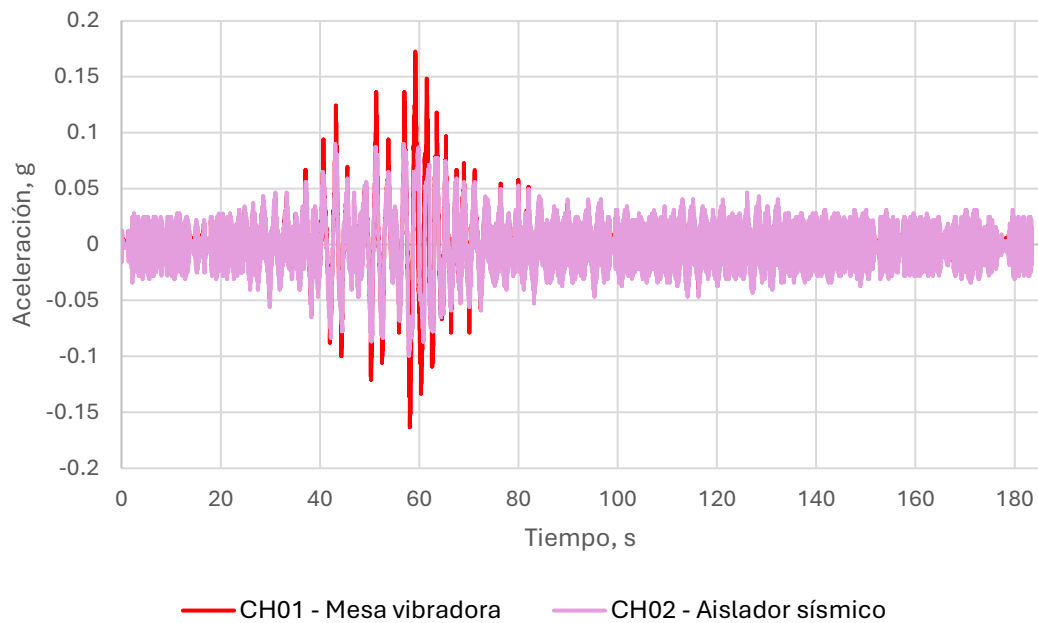


Figura 30. Comparación de aceleraciones en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento sísmico SCT.

Finalmente, se realizó una comparación entre las aceleraciones presentadas en la cima de la estructura y en la parte superior del aislador sísmico (Figura 31), mostrándose un aumento en las aceleraciones del 16%.

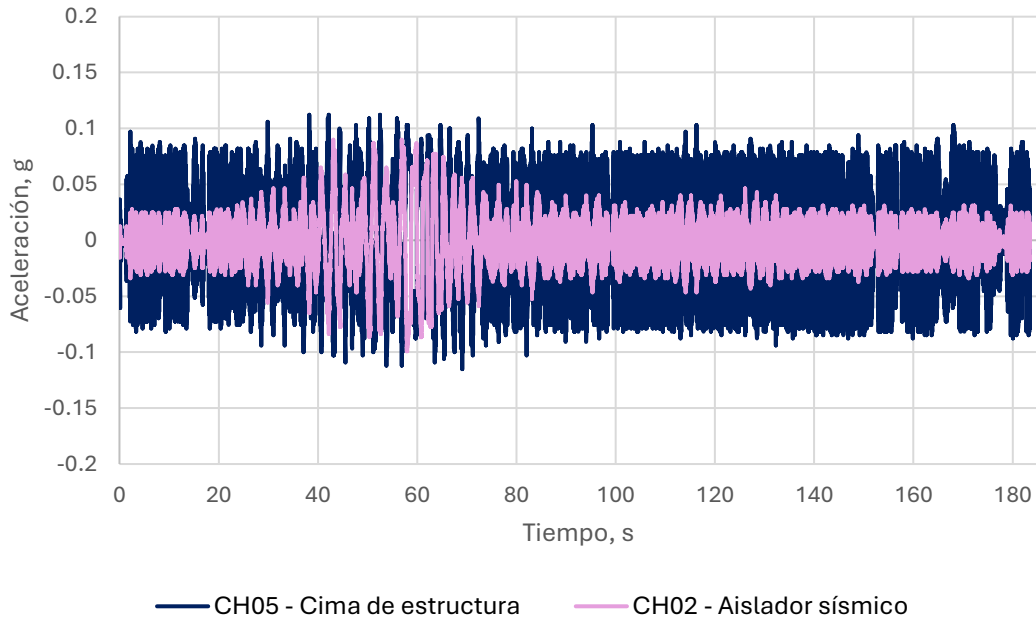


Figura 31. Comparación de aceleraciones en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento sísmico SCT.

En la Tabla 2 se presenta un resumen con los valores de aceleraciones máximas obtenidas correspondientes a los acelerómetros CH01 – Mesa vibradora, CH02 – Aislador sísmico y CH05 – Cima de estructura para todas las pruebas realizadas. Se puede observar que el sistema de aislamiento redujo significativamente las aceleraciones máximas.

Tabla 2. Aceleraciones máximas.

Prueba experimental	Aceleraciones máximas, g		
	Mesa vibradora	Aislador sísmico	Cima de estructura
Ruido blanco RMS 200 Gal	0.62	0.099	0.26
Senoidal, Frecuencia 2.0 Hz, Amplitud 75 mm	1.03	0.146	0.22
Movimiento sísmico CH84 100%	0.26	0.096	0.12
Movimiento sísmico SCT 75%	0.17	0.099	0.12

## 3.2 Desplazamientos laterales

Los desplazamientos laterales que presenta la estructura se obtuvieron mediante el programa DEGTRA Ver. 10.4.0 (IIUNAM, 2018), en el cual se realizó un proceso de integración doble a partir de las aceleraciones obtenidas para cada uno de los movimientos descritos en el programa de pruebas, para así obtener los desplazamientos de la estructura. Se utilizó una corrección de línea base y un proceso de filtrado con un intervalo de frecuencia de 0.2 – 30 Hz, de modo que se filtrara la mayor cantidad de ruido. En esta sección se presentan los resultados obtenidos para cada una de las pruebas en cada acelerómetro; es decir, en la mesa vibradora, sobre el aislador sísmico y en la cima de la estructura.

Las gráficas presentadas correspondientes a los desplazamientos laterales contienen en el eje vertical el desplazamiento en milímetros y en el eje horizontal el tiempo en segundos.

### 3.2.1 Ruido blanco

Las Figuras 32 a 34 presentan los desplazamientos laterales correspondientes al movimiento de Ruido blanco. Los desplazamientos máximos obtenidos, como se pueden observar en cada una de las gráficas, fueron de 69.4 mm para la mesa vibradora, de 11.2 mm en el aislador sísmico y de 11.9 mm en la cima de la estructura.

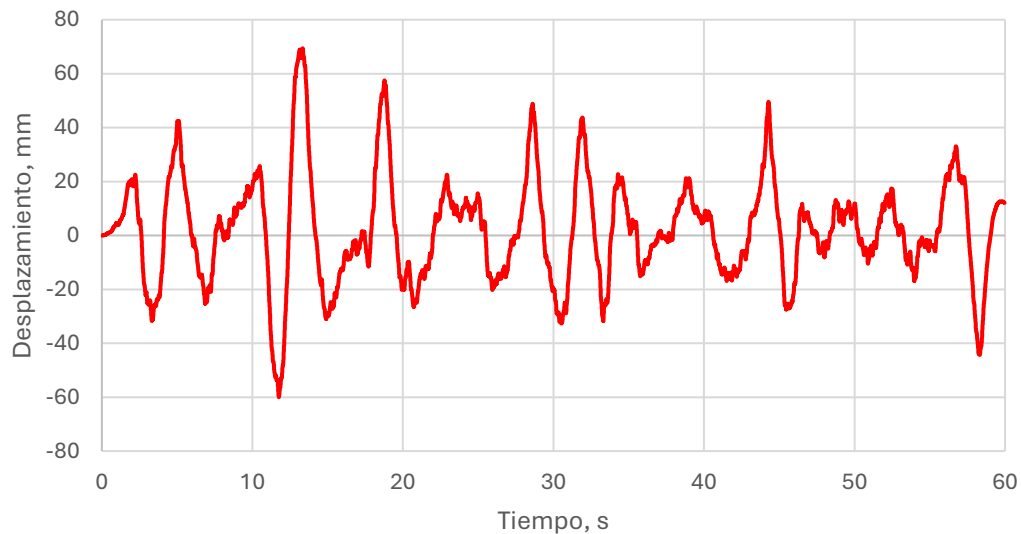


Figura 32. Historia de desplazamientos de CH01. Ruido blanco.

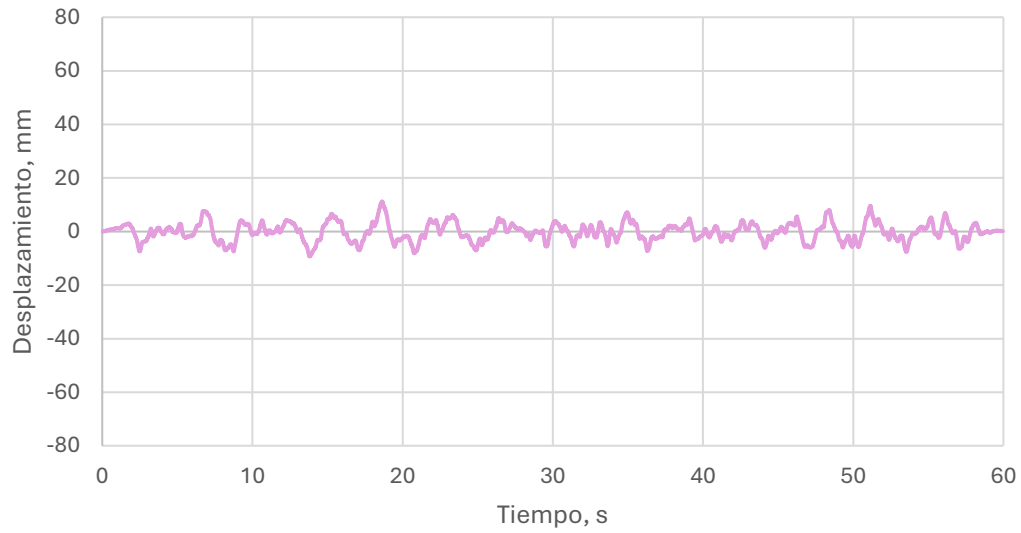


Figura 33. Historia de desplazamientos de CH02. Ruido blanco.

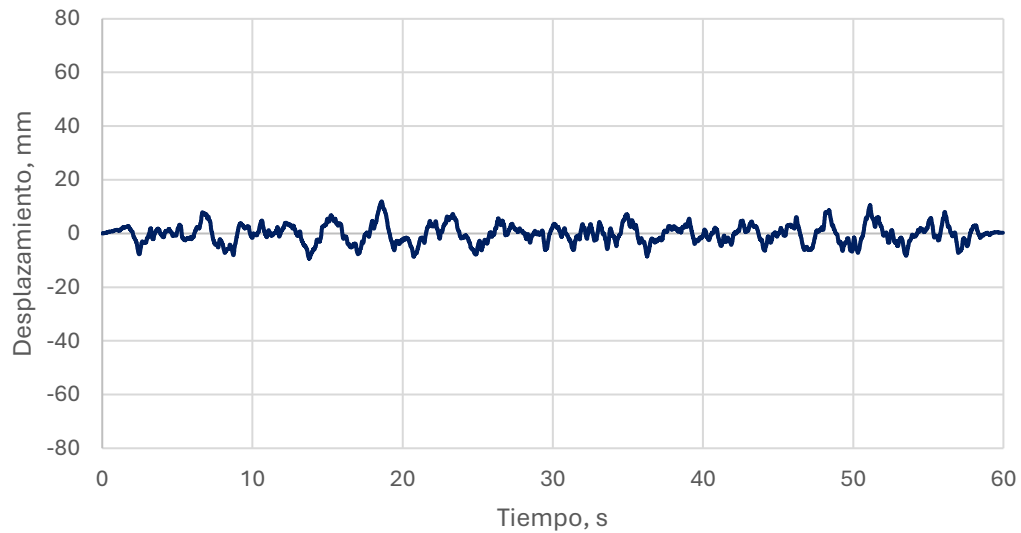


Figura 34. Historia de desplazamientos de CH05. Ruido blanco.

En la Figura 35 se muestra la comparación entre los desplazamientos en la mesa vibradora y sobre el aislador sísmico. Se observa una disminución del 84%, mostrando una buena respuesta del uso de dispositivos de aislamiento sísmico.

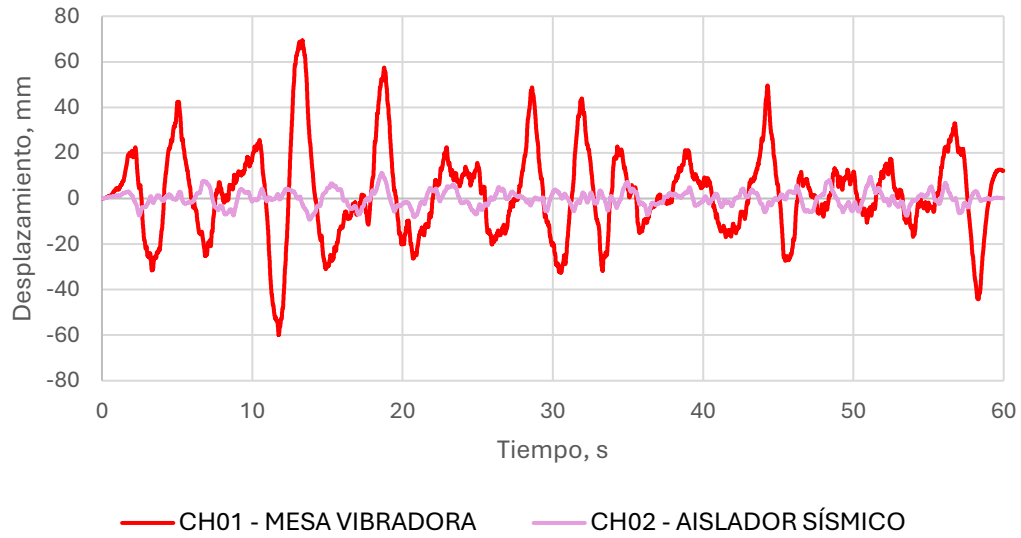


Figura 35. Comparación de desplazamientos en mesa vibradora y aislador sísmico. Ruido blanco.

Complementariamente, se realizó la comparación de los valores de desplazamiento entre el aislador sísmico y la cima de la estructura, como se muestra gráficamente en la Figura 36. Se aprecia un ligero aumento del 6.4%. Se puede observar que ambos desplazamientos fueron similares.

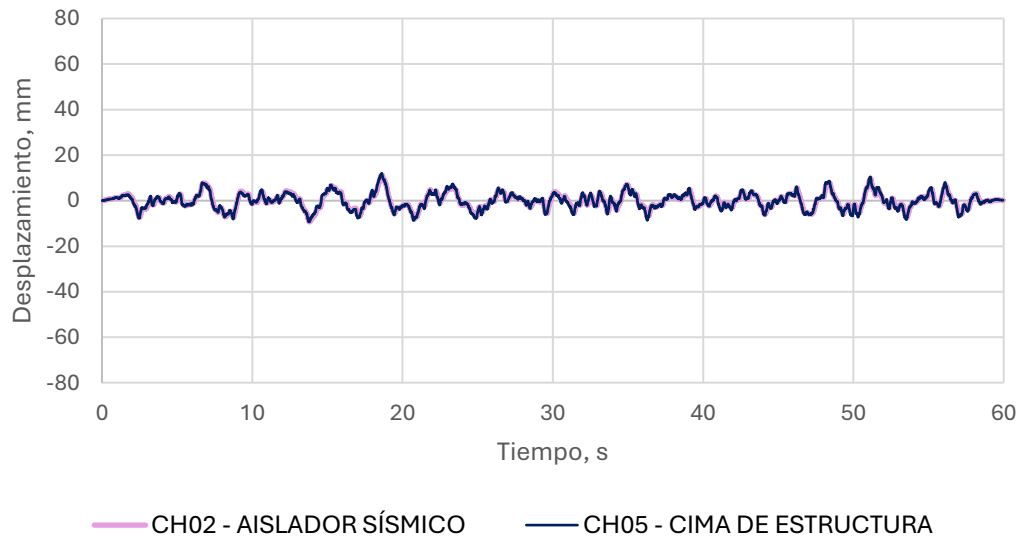


Figura 36. Comparación de desplazamientos en aislador sísmico y cima de estructura. Ruido blanco.

### 3.2.2 Movimiento senoidal

Se obtuvieron los valores de desplazamiento para el movimiento de tipo senoidal. Se observaron desplazamientos máximos de 60.8 mm en la mesa vibradora, de 29.6 mm en el aislador sísmico y de 30 mm en la cima de la estructura. Las gráficas individuales correspondientes a dichos desplazamientos se encuentran en el anexo B.

En la Figura 37, se realizó la comparación de los desplazamientos obtenidos en la mesa vibradora y en el aislador sísmico, en este último se obtuvo una reducción del 51% del desplazamiento máximo.

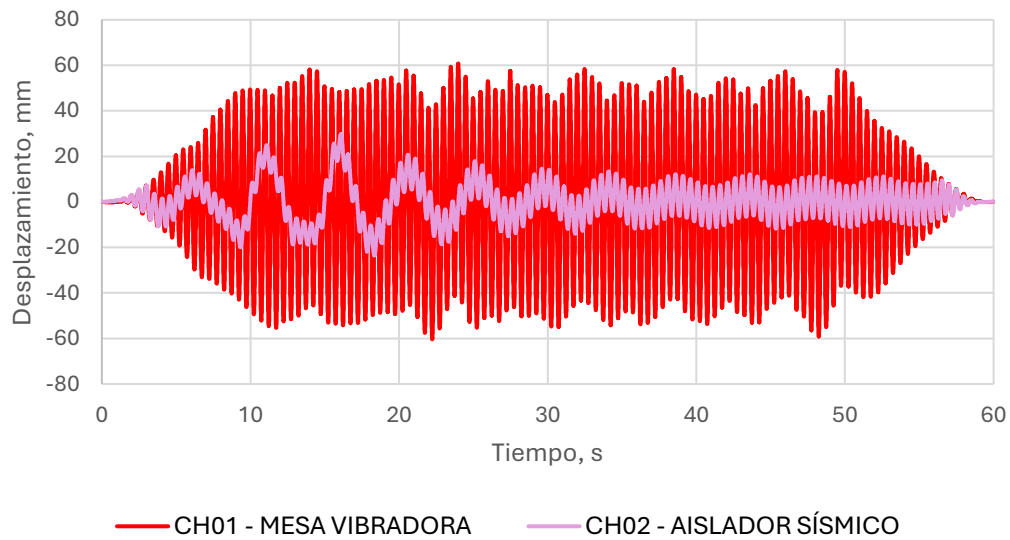


Figura 37. Comparación de desplazamientos en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento senoidal.

De forma similar, al realizar la comparación entre los desplazamientos de la cima de la estructura y el aislador sísmico (Figura 38), se obtuvo que existe un aumento en el desplazamiento del 1.4%.

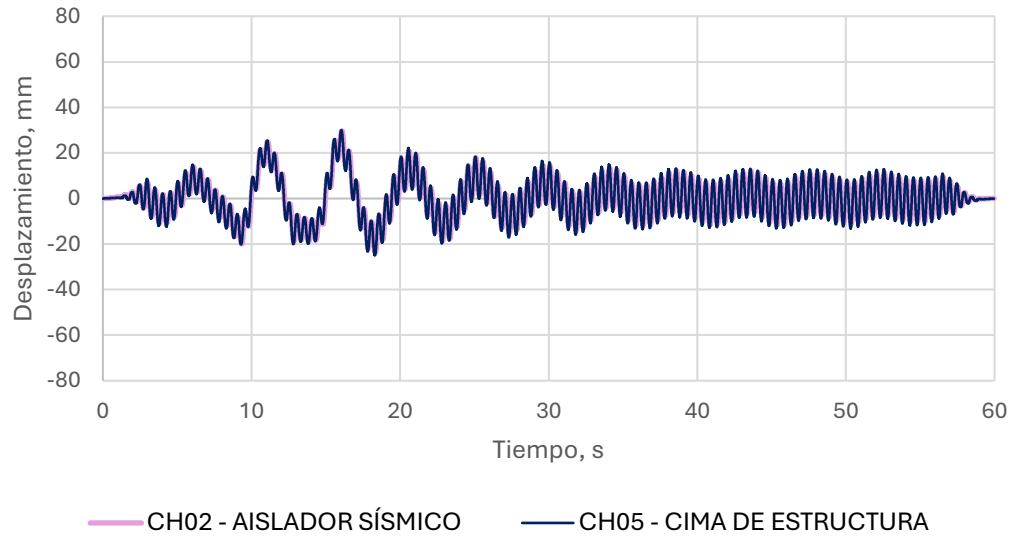


Figura 38. Comparación de desplazamientos en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento senoidal.

### 3.2.3 Movimiento sísmico CH84

Por facilidad, en esta sección se presentan comparaciones de interés, mientras que en el anexo B se presentan las gráficas individuales de cada uno de los desplazamientos obtenidos.

La Figura 39 muestra una comparación de desplazamientos en la mesa vibradora y sobre el aislador. Se observó un aumento en los desplazamientos máximos en comparación a los obtenidos por el movimiento de Ruido blanco y Senoidal. Estos fueron de 113.7 mm en la mesa vibradora, de 84.1 mm sobre el aislador y de 84.6 mm en la cima de la estructura.

Al comparar los desplazamientos máximos, se obtuvo una reducción del 26% del desplazamiento entre el aislador sísmico y la mesa vibradora. La reducción fue relativamente menor que la lograda en términos de aceleración máxima.

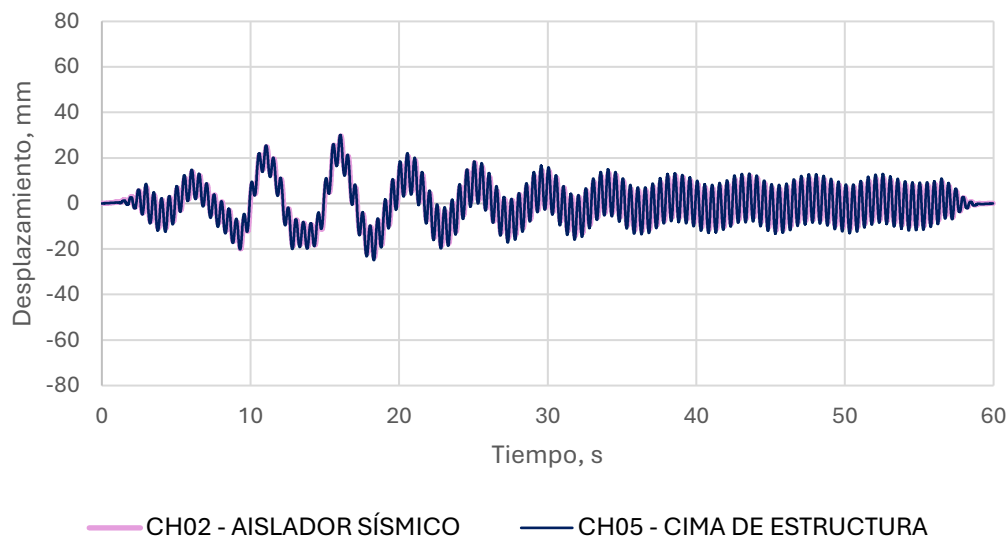


Figura 39. Comparación de desplazamientos en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento sísmico CH84.

Para la comparación entre los desplazamientos en el aislador sísmico y en la cima de la estructura (Figura 40), se encontró un aumento ligero de 0.54%, un porcentaje más bajo que los obtenidos en las comparativas anteriores.

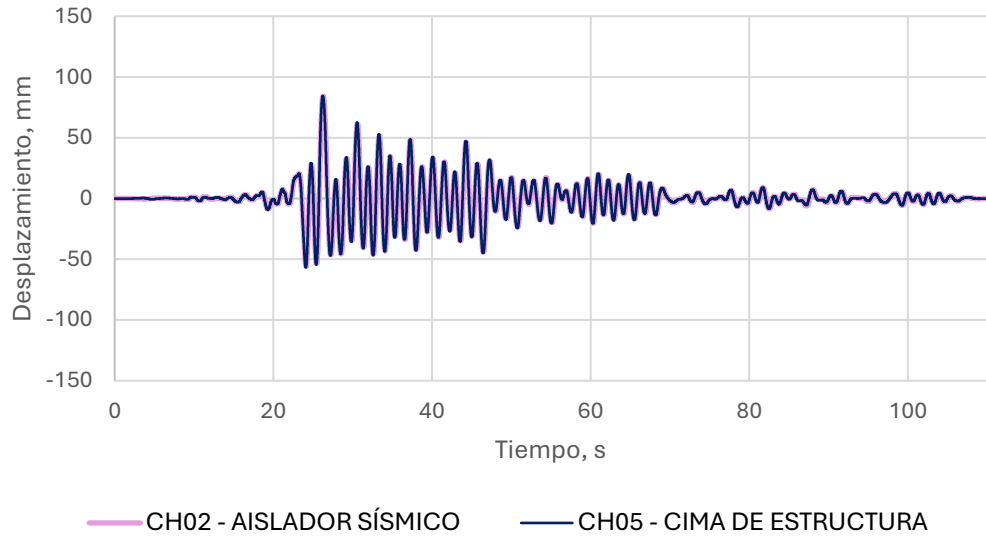


Figura 40. Comparación de desplazamientos en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento sísmico CH84.

### 3.2.4 Movimiento sísmico SCT

Se observaron desplazamientos en la mesa vibradora de 147.7 mm, en el aislador sísmico de 142.9 mm y 143.8 mm.

En la Figura 41 se comparan los desplazamientos en la mesa vibradora y en el aislador sísmico. Se observó una reducción en los desplazamientos máximos del 3.28%, la menor disminución presentada entre estos acelerómetros para cualquiera de las pruebas experimentales realizadas en el programa de pruebas.

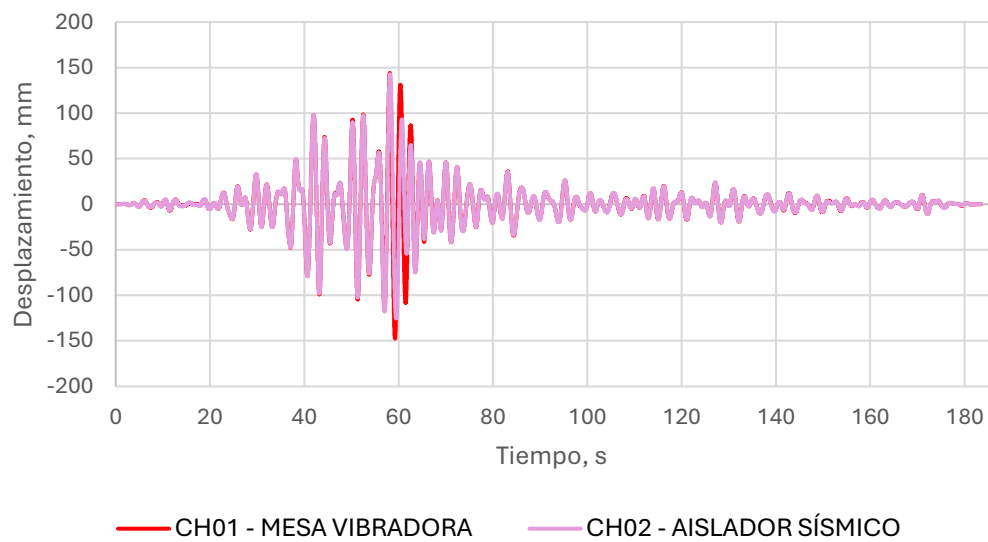


Figura 41. Comparación de desplazamientos en mesa vibradora y aislador sísmico. Movimiento sísmico SCT.

Finalmente, hubo un aumento ligero de los desplazamientos entre la cima de la estructura y el aislador sísmico de 0.62% (Figura 42). Un valor similar al presentado en los desplazamientos de la estación CH84.

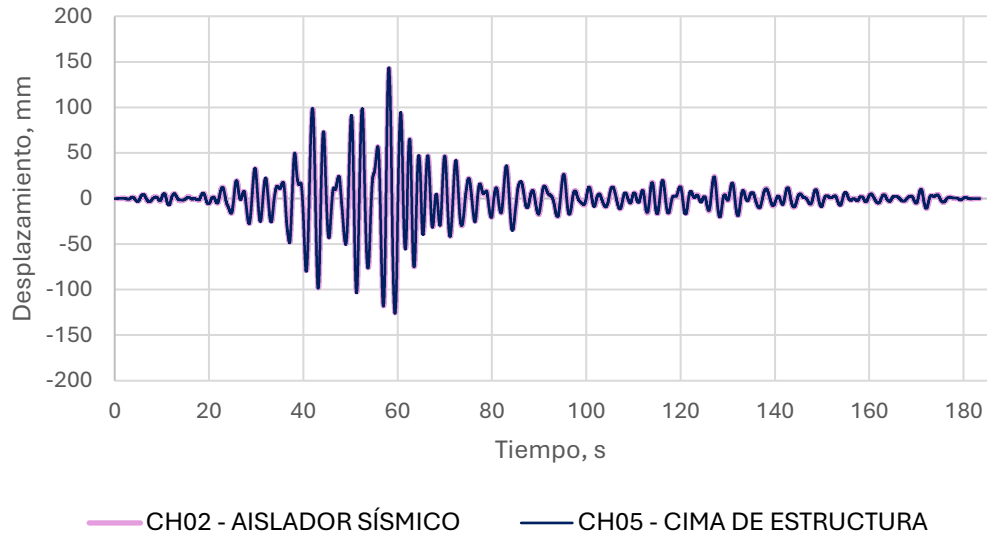


Figura 42. Comparación de desplazamientos en aislador sísmico y cima de estructura. Movimiento sísmico SCT.

En la Tabla 3 se muestran los desplazamientos máximos obtenidos en las cuatro pruebas experimentales realizadas de acuerdo con el programa de pruebas. Se pueden observar reducciones importantes para los movimientos de Ruido blanco y Senoidal, mientras que el impacto fue menor para los movimientos sísmicos.

Tabla 3. Desplazamientos máximos.

Prueba experimental	Desplazamientos máximos, mm		
	Mesa vibradora	Aislador sísmico	Cima de estructura
Ruido blanco RMS 200 Gal	69.4	11.2	11.9
Senoidal, Frecuencia 2.0 Hz, Amplitud 75 mm	60.8	29.6	30.0
Movimiento sísmico CH84 100%	113.7	84.1	84.6
Movimiento sísmico SCT 75%	147.7	142.9	143.8

### 3.3 Deslizamiento y distorsiones de entrepiso

Por medio de los desplazamientos laterales obtenidos sección 3.2, se calcularon los deslizamientos presentados en el aislador sísmico por medio de la diferencia entre los desplazamientos del aislador sísmico y de la mesa vibradora. De igual manera, se calcularon las distorsiones de entrepiso a partir de dividir el desplazamiento relativo de la estructura (entre la cima de la estructura y el aislador sísmico) entre la altura de entrepiso.

Primeramente, se realizaron los cálculos correspondientes al movimiento de Ruido blanco RMS 200 Gal. En la Figura 43 se presenta una comparación entre los desplazamientos en la mesa vibradora, el aislador sísmico y el deslizamiento generado entre ambas mediciones. El deslizamiento máximo que se registró en el aislador de tipo deslizante fue de 72 mm.

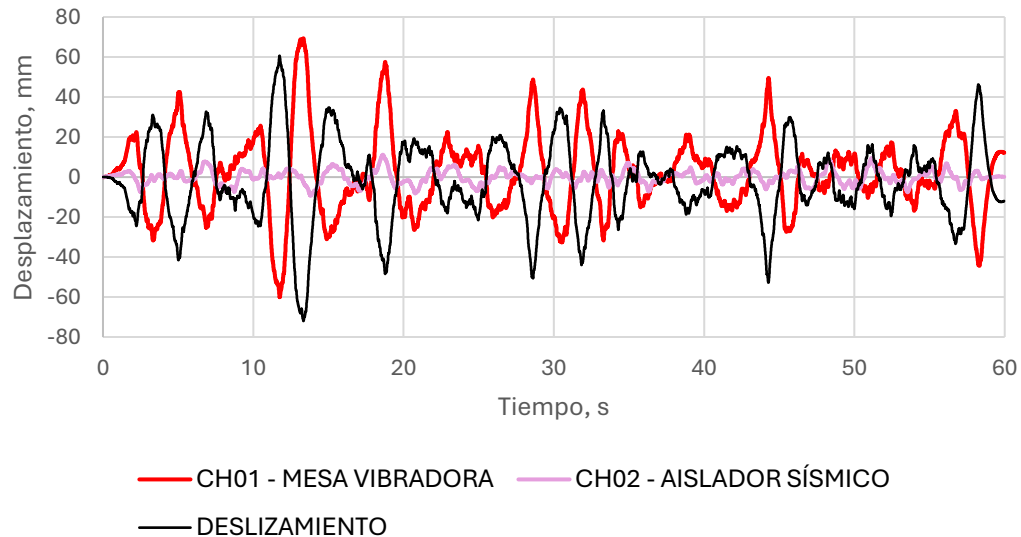


Figura 43. Deslizamiento generado en el aislador sísmico. Ruido blanco.

Por otra parte, en la Figura 44 se muestra la comparación de los desplazamientos de la parte superior e inferior del modelo, junto con el desplazamiento relativo generado.

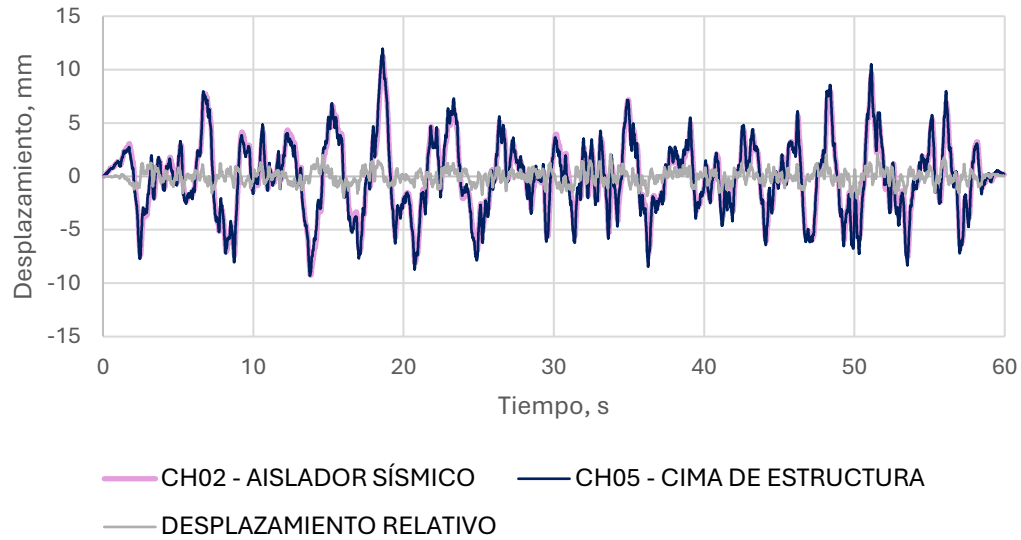


Figura 44. Desplazamiento relativo en entrepiso. Ruido blanco.

Para calcular la distorsión de entrepiso se aplicó la siguiente fórmula:

$$\gamma = \frac{\Delta}{h} \dots (1)$$

Donde:

$\Delta$  es el desplazamiento relativo entre la cima de la estructura y la parte superior del aislador.

$h$  es la altura de entrepiso del modelo.

El resultado de la distorsión de entrepiso máxima para este movimiento del programa de pruebas resultó de 0.0019.

Posteriormente, se analizaron los deslizamientos y desplazamientos relativos para el movimiento Senoidal. En la Figura 45, se realizó la comparación correspondiente de desplazamientos en la mesa vibradora y el aislador sísmico, junto con el deslizamiento obtenido en el aislador. El deslizamiento máximo obtenido en el dispositivo fue de 75.9 mm.

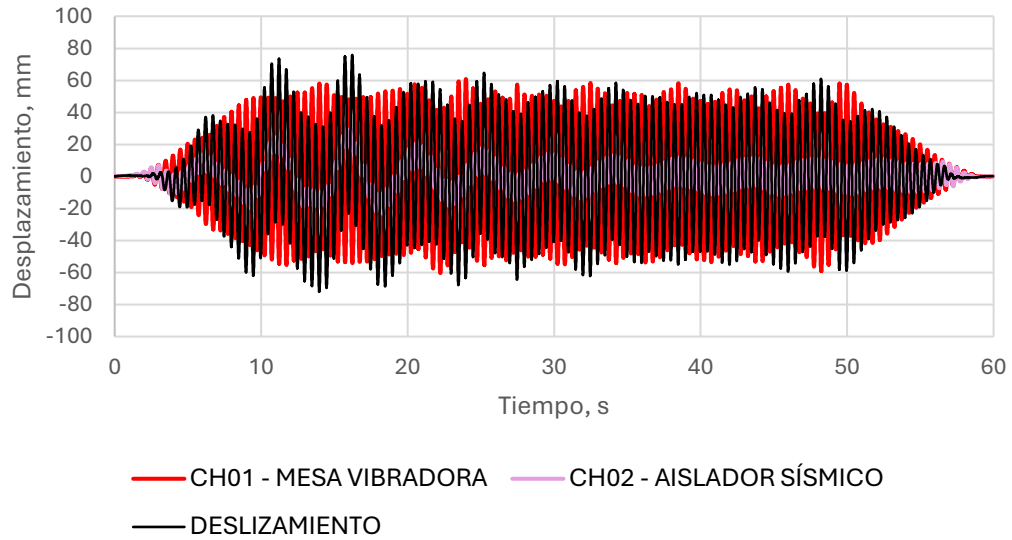


Figura 45. Deslizamiento generado en el aislador sísmico. Movimiento senoidal.

En la Figura 46 se muestra el desplazamiento relativo entre la cima de la estructura y el aislador sísmico, con un valor máximo de 5.6 mm, que es mayor que el obtenido para el caso del movimiento de Ruido blanco. Aplicando la ecuación (1), para obtener el valor de la distorsión de entrepiso, da como resultado 0.0050.

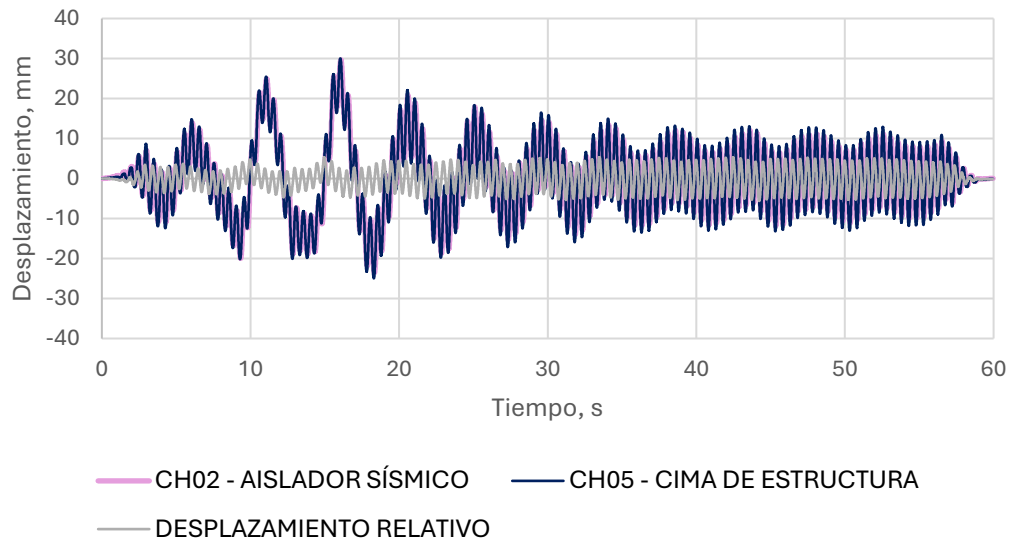


Figura 46. Desplazamiento relativo en entrepiso. Movimiento senoidal.

Para el caso de la tercera prueba experimental con el movimiento de la estación CH84 al 100%, se realizaron los cálculos correspondientes para obtener el deslizamiento y se obtuvo un valor pico de 113.3 mm (Figura 47). Un valor mucho mayor a los resultados de las pruebas anteriores.

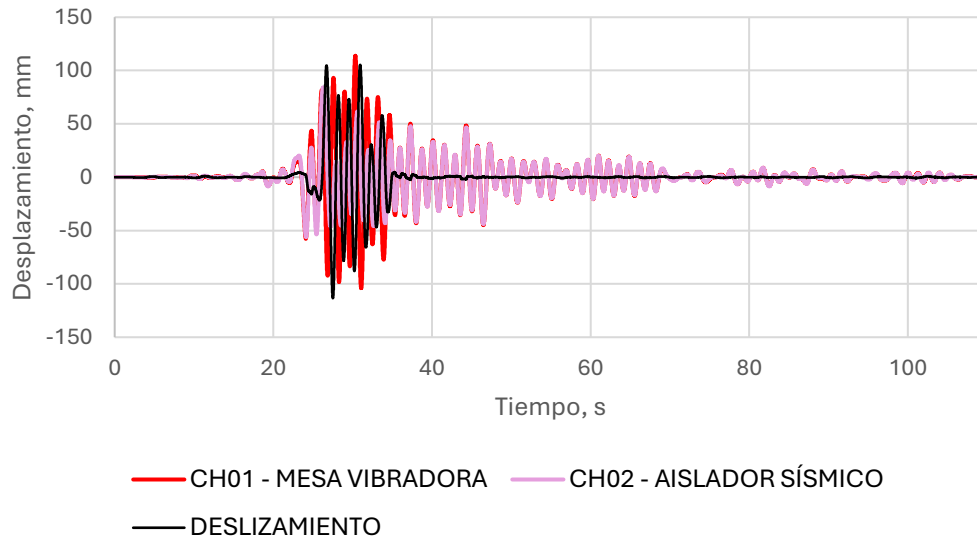


Figura 47. Deslizamiento generado en el aislador sísmico. Movimiento sísmico CH84.

Para el caso del desplazamiento relativo, se obtuvo un desplazamiento relativo máximo de 11.9 mm. A partir de la altura del modelo se obtuvo que su distorsión de entrepiso máxima fue 0.0107.

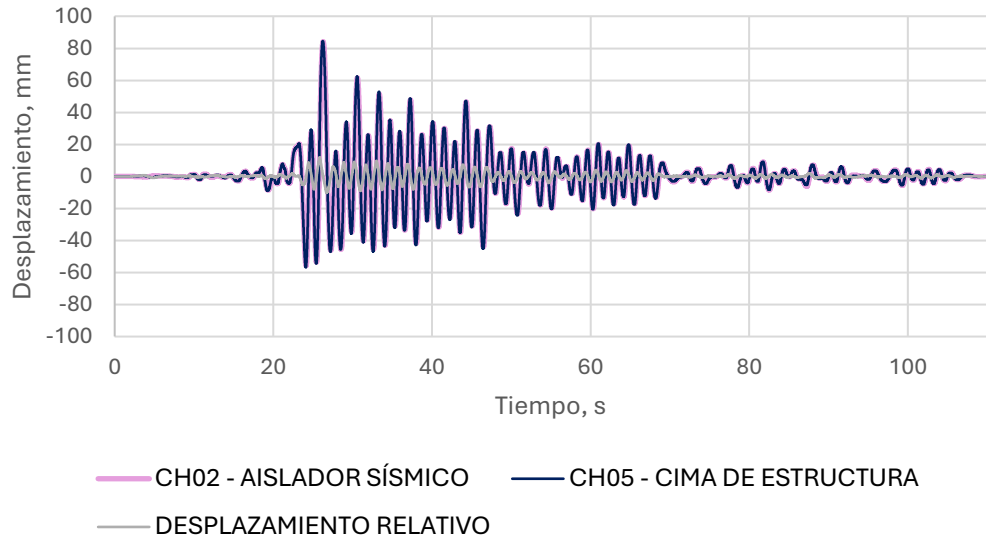


Figura 48. Desplazamiento relativo en entrepiso. Movimiento sísmico CH84.

Para finalizar, en la última prueba experimental realizada con el movimiento sísmico de la estación SCT escalado al 75%, se realizó la misma comparación que para los tres casos experimentales anteriores. Como se muestra en la Figura 49. Se obtuvo un valor de deslizamiento máximo en el aislador sísmico de 104.3 mm, el cuál es ligeramente menor que el deslizamiento generado por el movimiento de la estación CH84.

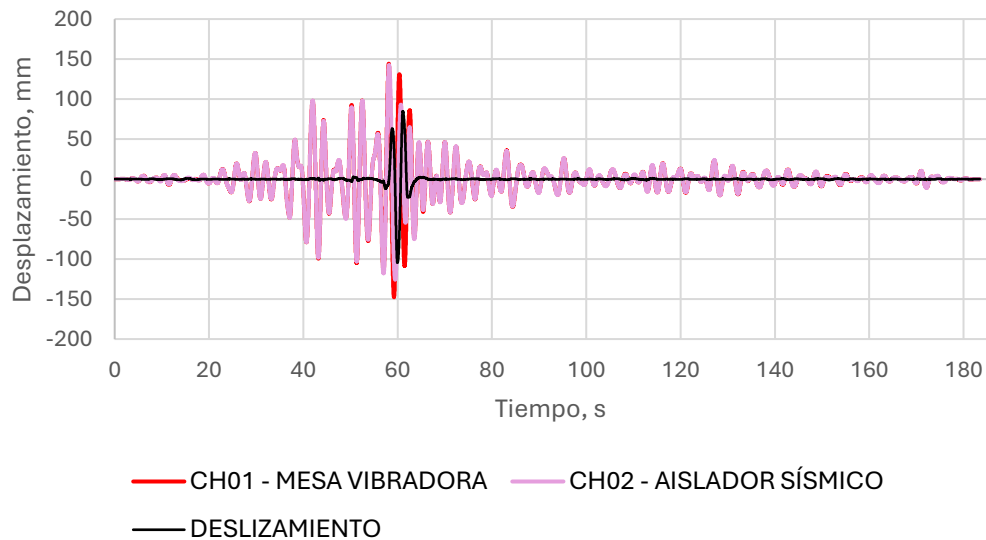


Figura 49. Deslizamiento generado en el aislador sísmico. Movimiento sísmico SCT.

En la Figura 50 se muestra el desplazamiento relativo, con un valor máximo de 15.2 mm. Dicho valor fue el más alto para cualquiera de las pruebas experimentales realizadas. De esta manera, se obtuvo que su distorsión de entrepiso fue de 0.0136.

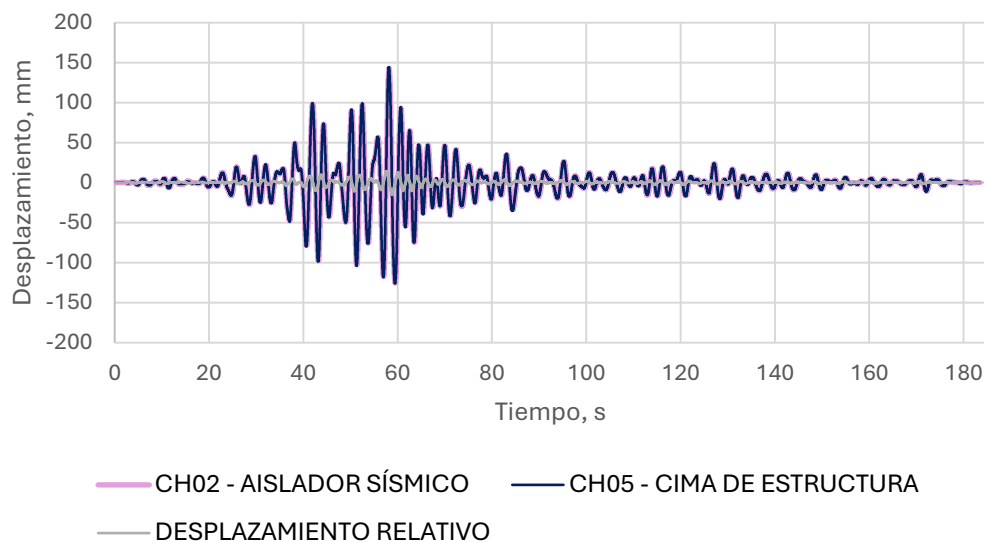


Figura 50. Desplazamiento relativo en entrepiso. Movimiento sísmico SCT.

En el anexo C se pueden observar de manera individual las gráficas de deslizamientos y desplazamientos relativos para cada una de las pruebas realizadas de acuerdo con el programa de pruebas establecido.

A manera de resumen, la Tabla 4 presenta los valores máximos obtenidos para el deslizamiento, el desplazamiento relativo y la distorsión de entrepiso, para cada una de las pruebas experimentales. Se observó que, en todos los casos, los valores fueron mayores para los movimientos sísmicos.

Tabla 4. Deslizamientos y desplazamientos relativos.

Prueba experimental	Deslizamiento	Despl. Relativo	Dist. de entrepiso
	mm	mm	-
Ruido blanco RMS 200 Gal	72.0	2.1	0.0019
Senoidal, Frecuencia 2.0 Hz, Amplitud 75 mm	75.9	5.6	0.0050
Movimiento sísmico CH84 100%	113.3	11.9	0.0107
Movimiento sísmico SCT 75%	104.3	15.2	0.0136

### 3.4 Funciones de transferencia

Las funciones de transferencia son cocientes que se realizan a partir de los Espectros de Fourier de registros de aceleraciones para obtener las propiedades dinámicas de un sistema estructural.

Para la obtención de las funciones de transferencia, se utilizó el programa DEGTRA Ver. 10.4.0 (IIUNAM, 2018). Se utilizaron los registros de aceleraciones correspondientes al movimiento de Ruido blanco RMS 200 Gal, Senoidal, CH84 al 100% y SCT al 75%. Dentro del programa, se realizó la corrección de línea base y el proceso de filtrado de frecuencia de 0.2 – 30 Hz. Se escogió dicho intervalo debido a que la frecuencia fundamental del modelo se encuentra contenida dentro de ese intervalo.

Como primer paso para la obtención de las funciones de transferencia, se obtuvieron los espectros de Fourier correspondientes a los registros de aceleraciones del aislador sísmico (CH02) y de la cima (CH05). Una vez obtenidos cada uno de los espectros, se calcularon los cocientes de Fourier (o funciones de transferencia) para cada uno de los movimientos.

Para todas las figuras que se presentan en esta sección, el eje vertical representa los valores del cociente de Fourier, mientras que el eje horizontal muestra los valores de la frecuencia en Hz.

En la Figura 51 se presenta la función de transferencia correspondiente al movimiento Ruido blanco. Se observa que la frecuencia fundamental se encuentra en 20.9 Hz.

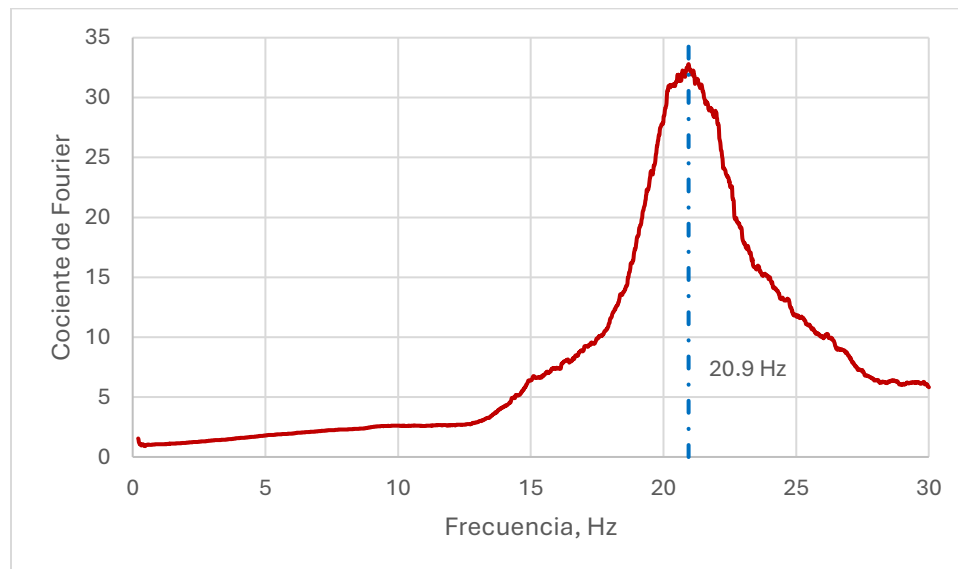


Figura 51. Función de transferencia correspondiente al movimiento ruido blanco.

En la Figura 52 se muestra la función de transferencia para el movimiento Senoidal. Se obtuvo que la frecuencia fundamental para este movimiento es de 20.6 Hz. Al momento de realizar la prueba experimental se presentó deslizamiento en los aisladores, el deslizamiento es un comportamiento no lineal debido a que no existe una proporcionalidad entre la fuerza y el desplazamiento que se genera, dando como resultado la función de transferencia atípica que se presenta en la siguiente figura.

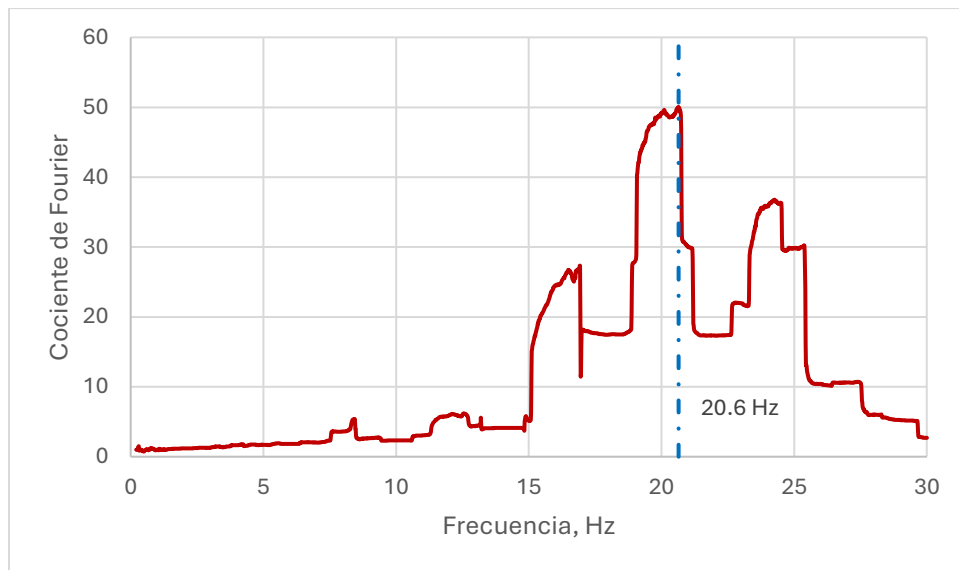


Figura 52. Función de transferencia correspondiente al movimiento senoidal.

Para la función de transferencia del movimiento registrado en la estación CH84 al 100% (Figura 53), registrado el 19 de septiembre de 2017, se obtuvo una frecuencia fundamental de 22.2 Hz.

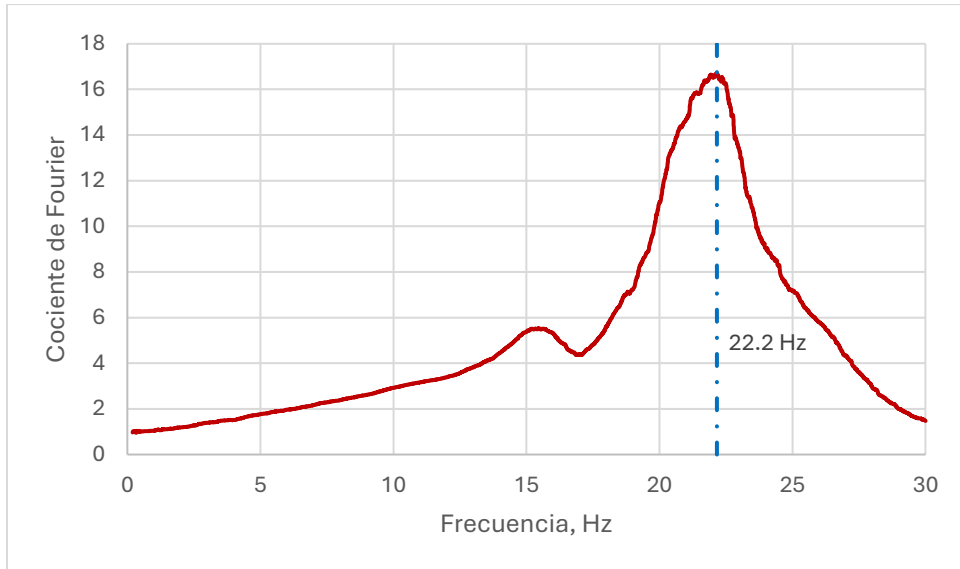


Figura 53. Función de transferencia correspondiente al movimiento sísmico CH84.

Por último, en la Figura 54 se presenta la función de transferencia correspondiente al movimiento sísmico del 19 de septiembre de 1985, que se registró en la estación SCT escalado al 75%. La frecuencia fundamental obtenida con el registro de aceleraciones es de 21.98 Hz, la cuál es similar a la registrada en la prueba experimental CH84 al 100%.

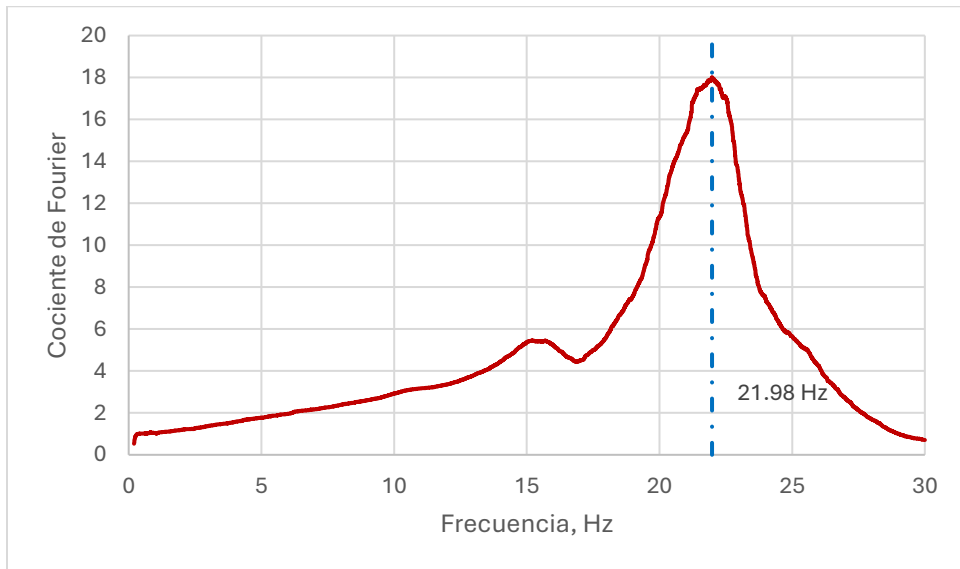


Figura 54. Función de transferencia correspondiente al movimiento sísmico SCT.

Para obtener el periodo fundamental de la estructura, se obtuvo el inverso de la frecuencia, como se muestra a continuación:

$$T = \frac{1}{f} \dots (2)$$

Donde:

$T$  es el periodo fundamental, en s.

$f$  es la frecuencia fundamental, en Hz.

A partir de la ecuación 2 se calcularon los periodos fundamentales de la estructura de acuerdo con cada uno de los movimientos utilizados en el programa de pruebas.

En la Tabla 5 se presenta un resumen de las frecuencias fundamentales y sus respectivos periodos calculados para cada una de las pruebas.

*Tabla 5. Frecuencias y periodos fundamentales de la estructura.*

Prueba experimental	Frecuencia	Periodo
	[Hz]	[s]
<b>Ruido blanco RMS 200 Gal</b>	20.9	0.048
<b>Senoidal, Frecuencia 2.0 Hz, Amplitud 75 mm</b>	20.6	0.048
<b>Movimiento sísmico CH84 100%</b>	22.2	0.045
<b>Movimiento sísmico SCT 75%</b>	22.0	0.045

Se puede observar que los resultados obtenidos para la frecuencia y el periodo de la estructura son similares. Con ello se muestra que no existe una gran discrepancia entre cada uno de los resultados. Se puede decir que los valores de periodo son de orden bajo, lo que quiere decir que la estructura tiene un comportamiento relativamente rígido.

Debido a que el movimiento de ruido blanco es generado con un contenido rico de frecuencias, la estructura en la mesa vibradora responde a todas ellas, por lo que, en la figura correspondiente a dicho movimiento muestra de manera más precisa la frecuencia dominante de la estructura. A partir de esta información, se puede decir que el periodo más preciso obtenido por medio de las funciones de transferencia es el de 0.048 s.

### 3.5 Curvas de histéresis de los aisladores

Las curvas de histéresis son diagramas carga – desplazamiento que permiten comprender el comportamiento de sistemas estructuras diversos.

En esta sección se presentan las curvas de histéresis del sistema de aislamiento. Para ello fue necesario normalizar la fuerza cortante en el sistema por el peso del modelo, de modo que se obtiene la siguiente igualdad:

$$\frac{V}{W} = \frac{m \times a}{W} = \frac{(W/g) \times a}{W} = \frac{a}{g} \dots (3)$$

Donde:

$V$  es la fuerza cortante.

$W$  es el peso del modelo ensayado.

$m$  es la masa del modelo.

$a$  es la aceleración sobre el aislador sísmico.

$g$  es la aceleración de la gravedad.

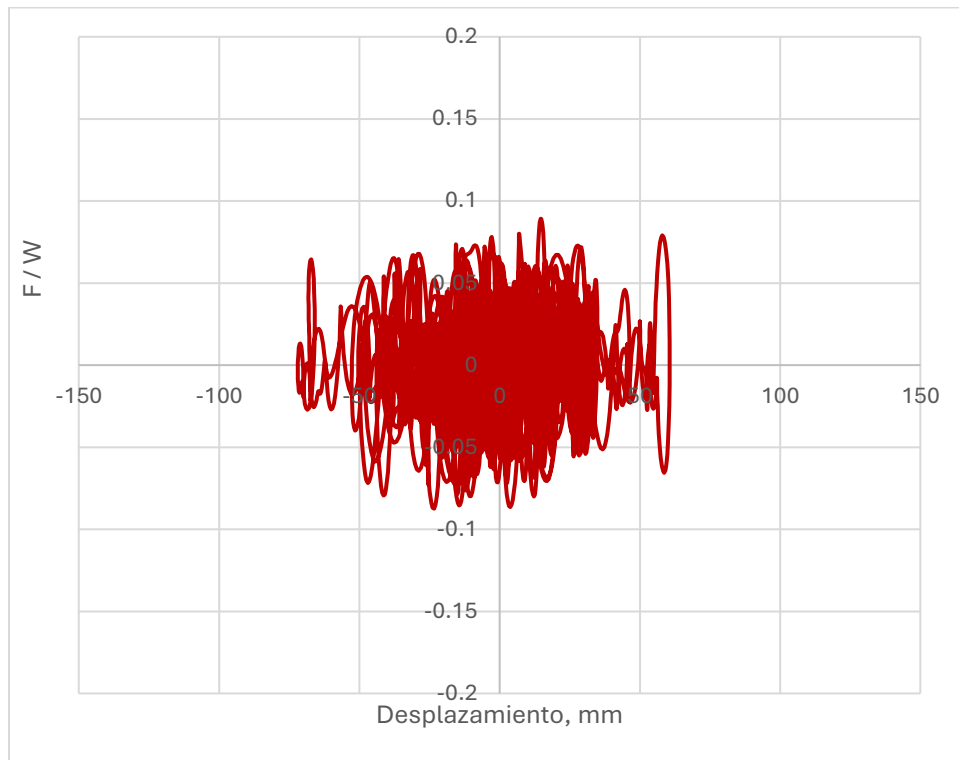
Gracias a la ecuación (3) se observa que se simplifica la obtención de las curvas de histéresis, pues los valores de  $V/W = a/g$  fueron ya presentados en la sección 3.1.

Además, con respecto a los desplazamientos, se utilizó el deslizamiento generado en el sistema de aislamiento registrado por los acelerómetros CH01 – Mesa vibradora y CH02 – Aislador sísmico, mismos valores que se presentaron en la sección 3.3 para cada uno de los movimientos del programa de pruebas.

Cabe aclarar que, por medio del programa DEGTRA Ver. 10.4.0 (IIUNAM, 2018), se realizó un proceso de filtrado para un intervalo de frecuencias entre 0.1 – 10 Hz, de modo que la señal registrada por el acelerómetro tuviera la menor cantidad de ruido posible.

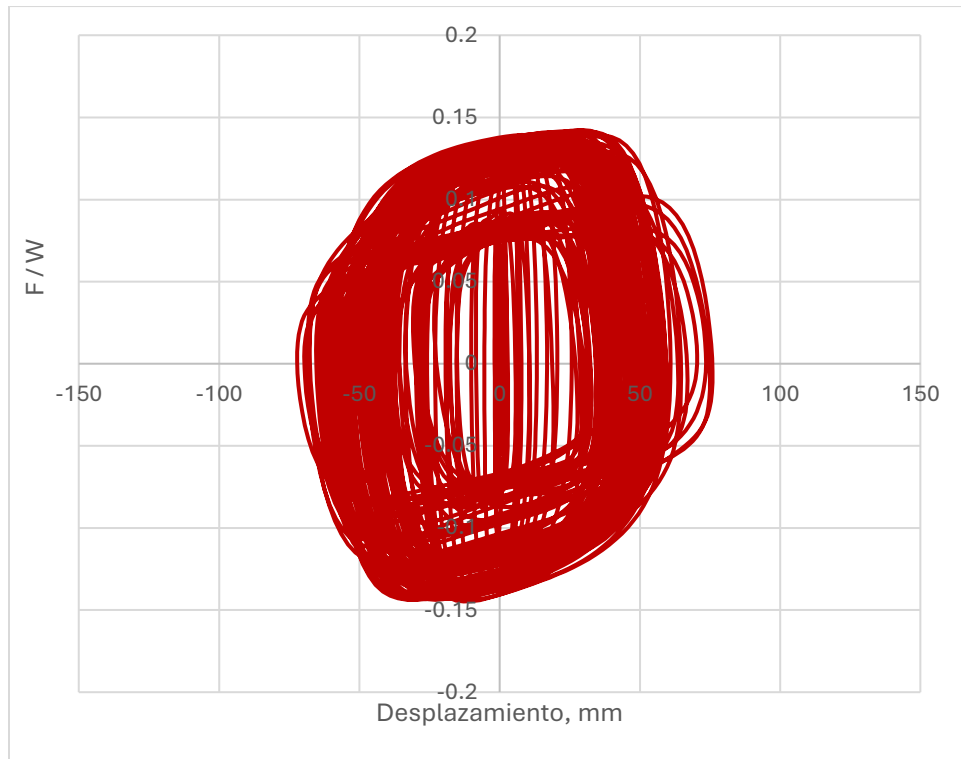
En cada una de las gráficas presentadas a continuación, el eje vertical representa la fuerza cortante normalizada por el peso de la estructura, mientras que en el eje horizontal se muestra el desplazamiento en mm.

En la Figura 55 se muestra la curva de histéresis generada para el sistema de aislamiento sísmico con el movimiento Ruido blanco, en la cual el desplazamiento está en un rango de -72 a 61 mm. No se observa una meseta clara al aplicar este tipo de movimiento, pero el valor aproximado del porcentaje máximo de la fuerza con respecto al peso de la estructura es de 9%.



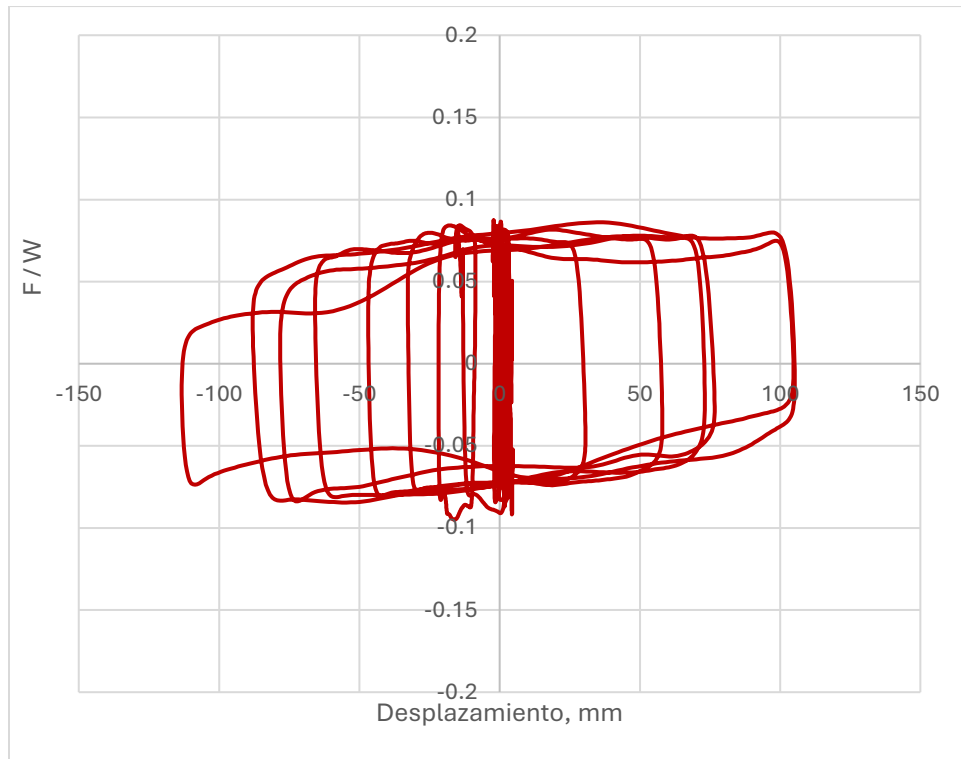
*Figura 55. Curva de histéresis del movimiento ruido blanco.*

La curva de histéresis obtenida para el movimiento de tipo senoidal se muestra gráficamente en la Figura 56. Se observa que los desplazamientos máximos son de -72 a 76 mm, en dicha gráfica se presentan mesetas ligeramente más claras y el porcentaje de fuerza cortante máxima con respecto al peso, es de aproximadamente 14%.



*Figura 56. Curva de histéresis del movimiento senoidal.*

En la Figura 57 se presenta la curva de histéresis del registro CH84 al 100%. En ella se puede observar un comportamiento histerético bien definido, con mesetas claras y una gran área dentro de las curvas, lo que demuestra una gran cantidad de energía disipada en comparación con los movimientos mostrados previamente. Los desplazamientos máximos observados son de -113 a 105 mm, y el porcentaje de fuerza lateral máxima con respecto al peso de la estructura es de alrededor del 9%.



*Figura 57. Curva de histéresis del movimiento sísmico CH84.*

Por último, en la Figura 58 se puede observar la curva de histéresis obtenida para el último movimiento sísmico, el cual corresponde al de la estación SCT escalado al 75%. En ella se puede observar que los desplazamientos máximos son de -104 a 85 mm siendo esta la menos simétrica. Su porcentaje de fuerza cortante máxima con respecto al peso es cercano al 9%. El área que se presenta dentro de la curva de histéresis sugiere un buen comportamiento en cuanto a disipación de energía.

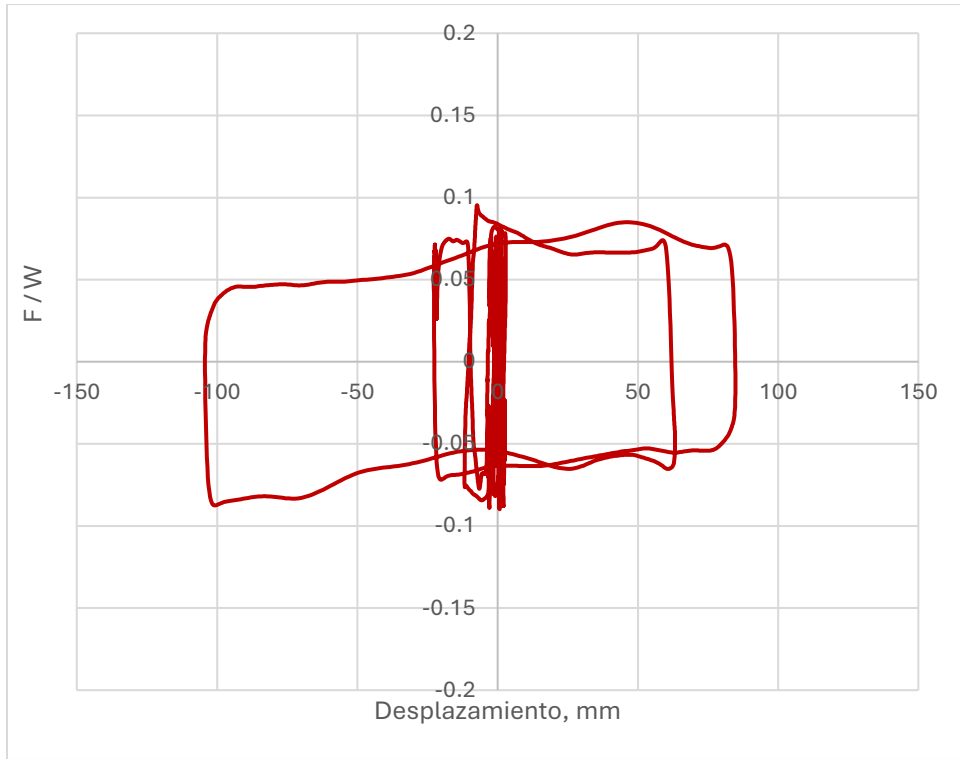


Figura 58. Curva de histéresis del movimiento sísmico SCT.

## Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

Se realizaron pruebas experimentales en mesa vibradora de un modelo de madera, equipado con aisladores sísmicos de tipo deslizante. Se ofrecen las conclusiones siguientes.

Las aceleraciones máximas obtenidas varían de acuerdo con el tipo de movimiento utilizado. El valor máximo de ellas para la mesa vibradora se obtuvo con el movimiento de tipo senoidal, con una aceleración de 1.03 g, mientras que las aceleraciones menores se obtuvieron en la prueba experimental con el movimiento sísmico registrado en la estación SCT escalado al 75% con un valor de 0.17 g.

Con respecto a las aceleraciones obtenidas en el acelerómetro ubicado sobre el aislador sísmico, se puede observar en la Tabla 2 que los valores son similares para los movimientos de Ruido blanco (con 0.099 g), CH84 al 100% (con 0.096 g) y SCT al 75% (con 0.099 g); mientras que en el movimiento senoidal se obtuvo un valor mayor (con 0.146 g).

Calculando las reducciones de aceleraciones máximas ubicadas en el aislador sísmico para los movimientos de las estaciones CH84 y SCT, se muestra que para el primero se redujo al 37% y para el segundo al 57%. En cambio, para los movimientos de ruido blanco y senoidal, la disminución fue mayor, reduciéndola al 16% y 14%, respectivamente, de los valores iniciales registrados en la mesa vibradora. Lo anterior demuestra la variación en la efectividad del uso de aislamiento sísmico de acuerdo con el tipo de movimiento que se presente.

En cuanto a las aceleraciones registradas en la cima de la estructura, estos valores aumentaron con respecto a los registrados en los aisladores, pero son menores en comparación a los de la mesa vibradora. Para los movimientos de las estaciones acelerométricas (CH84 y SCT), los valores de aceleración fueron similares.

Los desplazamientos máximos registrados en la mesa vibradora se obtuvieron con los movimientos de las estaciones CH84 y SCT, obteniendo valores de 113.7 mm y 147.7 mm, respectivamente. En cuanto a los desplazamientos máximos registrados en el aislador sísmico, se obtuvo una reducción considerable del 84% para el movimiento de ruido blanco y del 51% en el senoidal, mientras que para los movimientos de las estaciones acelerométricas fueron del 26% en CH84 y 3.28% para SCT. Para este último movimiento se debe de considerar que fue el más largo, con una duración de 185 segundos, y sus desplazamientos fueron similares a los de la mesa vibradora. De acuerdo con los resultados de desplazamientos máximos obtenidos en la cima de la estructura, se puede observar que se registraron valores similares a los del aislador sísmico, lo que indica comportamiento rígido de la estructura.

En la Tabla 4 se muestra el deslizamiento generado por el uso de dispositivos de aislamiento sísmico obtenido para cada uno de los movimientos del programa de pruebas. Los valores de 113.3 mm y 104.3 mm en las estaciones CH84 y SCT, respectivamente, muestran que dichos dispositivos pueden generar una mayor cantidad de deslizamiento cuando se presentan movimientos sísmicos reales en comparación a los movimientos de ruido blanco (72 mm) y senoidal (75.9 mm).

Los valores de las distorsiones de entrepiso obtenidas resultaron variables para cada uno de los movimientos, siendo la menor (0.0019) la registrada en el movimiento de ruido blanco, y la mayor en la de la estación SCT (0.0136).

Gracias al cálculo de las funciones de transferencia obtenidas se pudo observar que las frecuencias para cada uno de los movimientos tenían valores similares, los cuales estaban ubicados entre los 20 y 22 Hz, lo que significa que se encontraban dentro de un intervalo cercano. Al obtener el periodo, de igual manera resultaron valores cercanos entre sí los cuáles fueron bajos (de 0.045 a 0.048 s), demostrando la alta rigidez que tiene el modelo con el cuál se realizaron las pruebas experimentales. El valor más representativo del periodo fundamental de la estructura es el obtenido con el movimiento de ruido blanco, con un valor de 0.048 segundos.

A partir de las curvas de histéresis que se mostraron en la sección 3.5, se pudo observar que tres pruebas comparten un porcentaje de fuerza cortante con respecto al peso del modelo propuesto del 9%, y únicamente el movimiento senoidal tuvo un porcentaje mayor (14%). Dicho porcentaje puede deberse a que las aceleraciones correspondientes al movimiento senoidal fueron las mayores, rebasando 1 g. La uniformidad de estos resultados demuestra que el aislador sísmico tiene un comportamiento predecible en las pruebas experimentales realizadas, debido a que todos los porcentajes obtenidos se encuentran en un intervalo bajo de carga.

Una prueba importante de la efectividad del uso de dispositivos de aislamiento sísmico de tipo deslizante son las curvas de histéresis obtenidas a partir de los registros acelerométricos de las estaciones CH84 al 100% y SCT al 75% (Figuras 57 y 58, respectivamente), debido a que estos son movimientos sísmicos reales y se muestra una mayor área ubicada en la parte interior de las curvas, demostrando una gran cantidad de energía disipada por el aislador.

De manera general, se puede llegar a la conclusión que los dispositivos de aislamiento sísmico contribuyen a la disminución significativa de las aceleraciones registradas en la superestructura.

## 4.2 Recomendaciones

Se recomienda hacer uso de sensores de desplazamiento en este tipo de pruebas, ya que en el experimento sólo se usaron acelerómetros. Ello brindaría una mayor precisión en los resultados obtenidos, ya que al utilizar el método de la doble integral (como el utilizado en el presente trabajo), hay efectos por el ruido, lo que ocasiona que se necesiten procesos de filtrado más profundos y esto conlleva a la variación de desplazamientos con respecto a valores más cercanos a la realidad.

De igual manera, se recomienda realizar pruebas experimentales con el mismo modelo propuesto, pero sin el uso de dispositivos de aislamiento sísmico, de modo que se pueda realizar una comparación de los resultados obtenidos de aceleraciones y desplazamientos, ya que con ello se podría demostrar de manera más precisa la efectividad de los aisladores. Con esas pruebas experimentales también se podrían comprobar otros resultados, como el periodo de la estructura y otros parámetros de interés.

## Referencias

- Abud, R. (2022). *Torre del Instituto Salvador Zubirán, primer hospital en México con aisladores sísmicos deslizantes*. Obtenido de Streaming IINGEN: <https://www.youtube.com/watch?v=MPH8miI0oE8>
- Benicke, O., Okumusoglu, D., & Huber, P. (2019). *Examples for seismic isolation system fulfilling no damage criteria and with continued functionality*. Obtenido de Canadian Association for Earthquake Engineering and Seismology: <https://www.cae.ca/12CCEEpdf/192-V6Rq-1311.pdf>
- Christopoulos, C., & Filiatrault, A. (2006). *Principles Of Passive Supplemental Damping And Seismic Isolation*. Pavia, Italia: IUSS PRESS.
- CIRES. (2026). *Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C.* Obtenido de Red Acelerográfica de la Ciudad de México: [http://www.cires.org.mx/racm\\_n.php](http://www.cires.org.mx/racm_n.php)
- Gaceta oficial de la Ciudad de México. (2004). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. *RCDF*. Ciudad de México, México.
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México. (2023). Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Cimentaciones. *NTC-Cimentaciones*. Ciudad de México, México.
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México. (2023). Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo. *NTC-Sismo*. Ciudad de México, México. Obtenido de NTC-Sismo.
- Guerrero, H., Aguilar, J., & Sámano, O. (2022). *Comportamiento sísmico de edificios con aisladores de péndulo de fricción en la zona del lago de la Ciudad de México*. Obtenido de Revista Ingeniería Sísmica, SMIS: <https://www.smis.mx/index.php/RIS/article/view/584/613>
- Kelly, T. E., Skinner, R. I., & Robinson, W. (2010). *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*. Robinson Seismic Limited.
- MAGEBA. (2016). *What you should know about seismic isolation solutions*. Obtenido de MAGEBA Group: <https://www.mageba-group.com/cz/en/1078/223329/What-you-should-know-about-seismic-isolation-solutions.htm>
- Makris, N. (2019). Seismic isolation: Early History. *Earthquake Engineering & Estructural Dynamics*, 48 (2), 269-283.
- MAURER. (2021). *First hospital with seismic isolation in Mexico City*. Obtenido de MAURER: [https://www.maurer.eu/fileadmin/user\\_upload/PR\\_Tlahuac\\_EN.pdf](https://www.maurer.eu/fileadmin/user_upload/PR_Tlahuac_EN.pdf)

MAURER. (2021). *Mexico: Optimum seismic protection for airport terminal*. Obtenido de MAURER:

[https://www.maurer.eu/fileadmin/user\\_upload/PR\\_Airport\\_Mexico\\_EN.pdf](https://www.maurer.eu/fileadmin/user_upload/PR_Airport_Mexico_EN.pdf)

Ramírez, L., Ayala, M., Vázquez, R., Aguilar, L., Suárez, M., Castro, G., . . . Delgado, M. (17 de Diciembre de 2024). *La estación de pozo y superficie*, *Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)*. Obtenido de Gaceta del Instituto de Ingeniería UNAM: <https://www.iingen.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Gaceta/Noviembre-Diciembre-2024/Paginas/La-estacion-de-pozo-y-superficie-SCT.aspx>

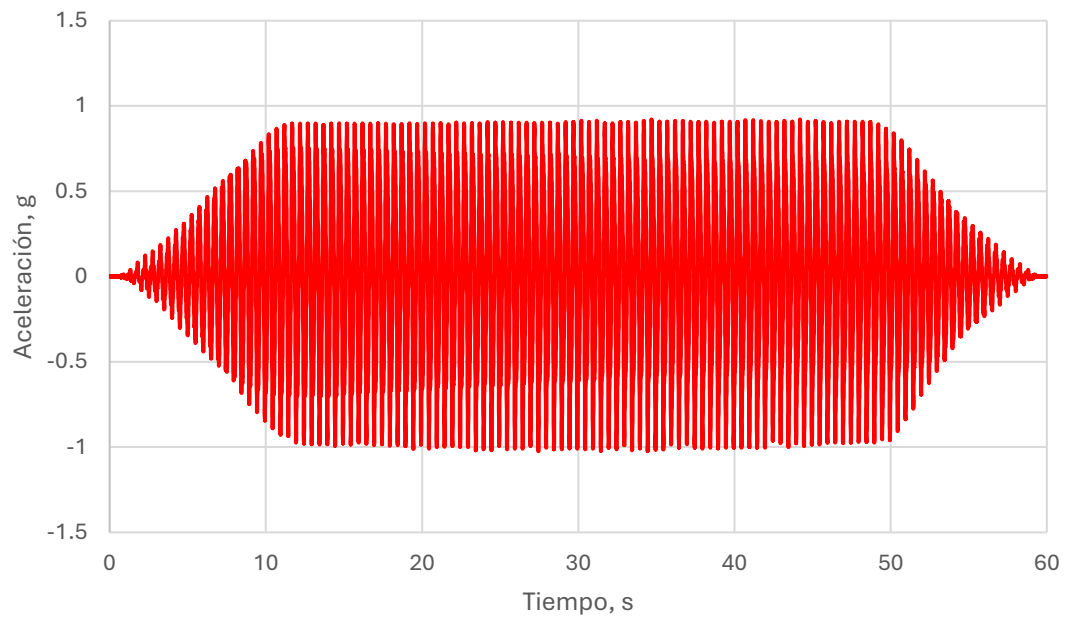
SEAONC. (2023). *Structures / Apple Park*. Obtenido de Structural Engineers Association Of Northern: <https://legacy.seaonc.org/structure/apple-park/>

SMIG. (2024). *Manuel González Flores*. Obtenido de Premios SMIG: [https://www.smig.org.mx/smig/premios/manuel\\_flores\\_smig.php#](https://www.smig.org.mx/smig/premios/manuel_flores_smig.php#)

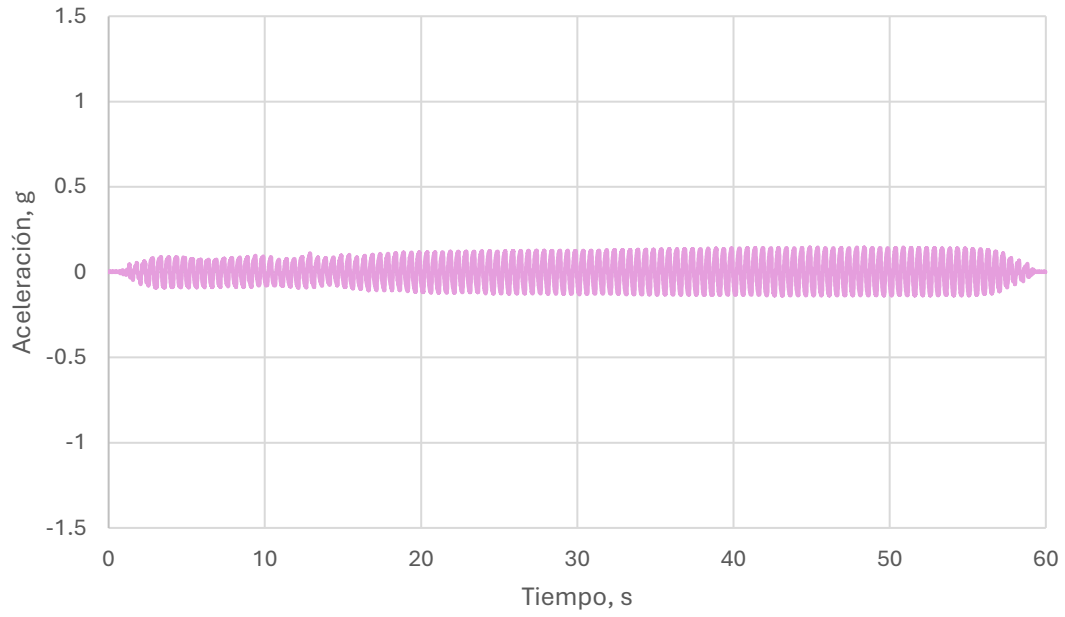
# Anexos

## Anexo A. Aceleraciones medidas

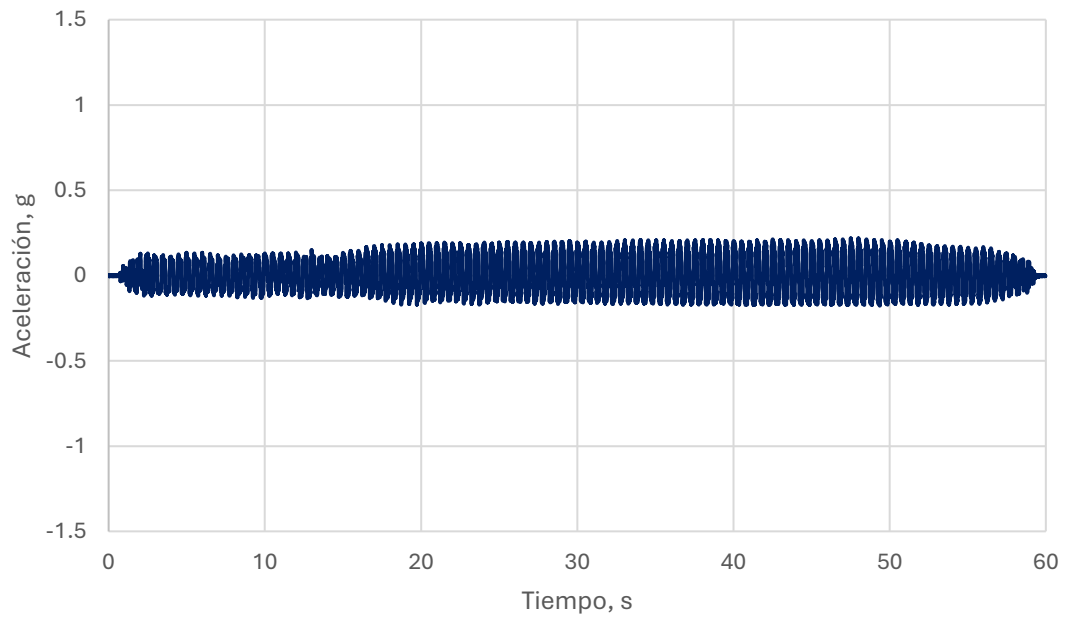
### A.1. Movimiento senoidal



*Figura 59. Registro de aceleraciones de CH01. Movimiento senoidal.*



*Figura 60. Registro de aceleraciones de CH02. Movimiento senoidal.*



*Figura 61. Registro de aceleraciones de CH05. Movimiento senoidal.*

## A.2. Movimiento sísmico CH84

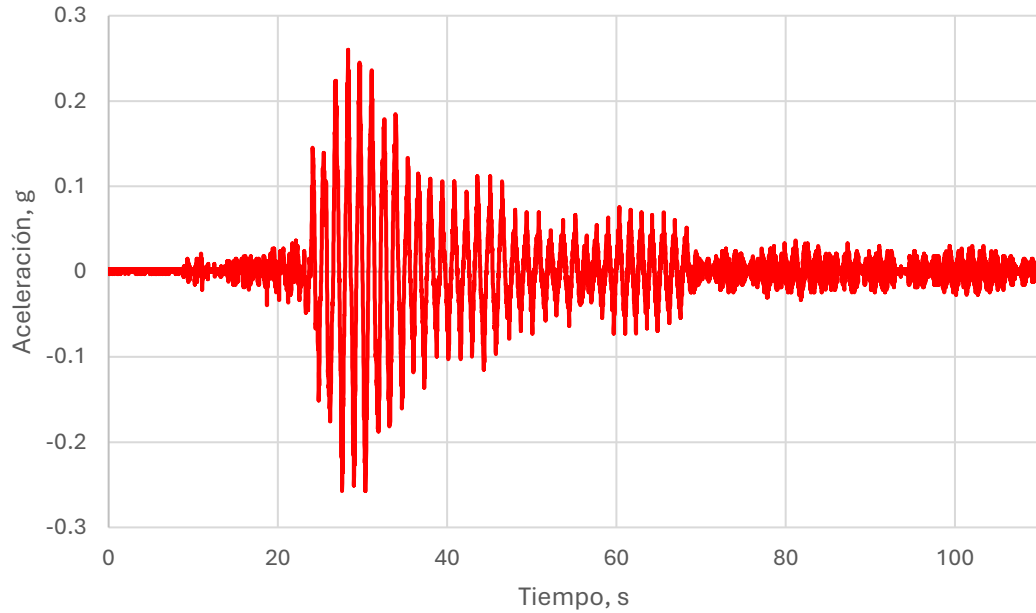


Figura 62. Registro de aceleraciones de CH01. Movimiento sísmico CH84.

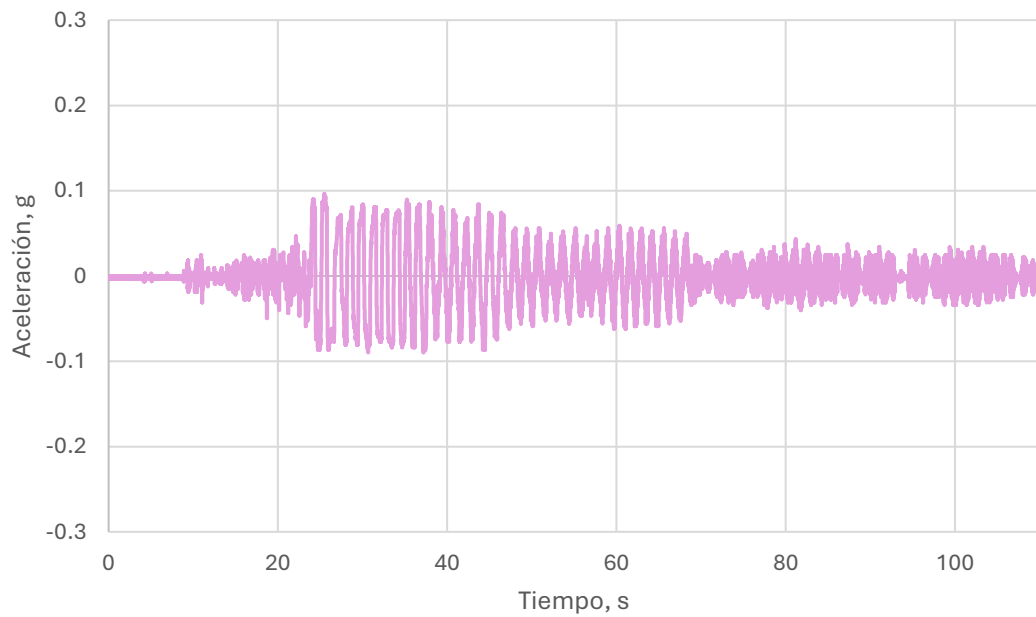


Figura 63. Registro de aceleraciones de CH02. Movimiento sísmico CH84.

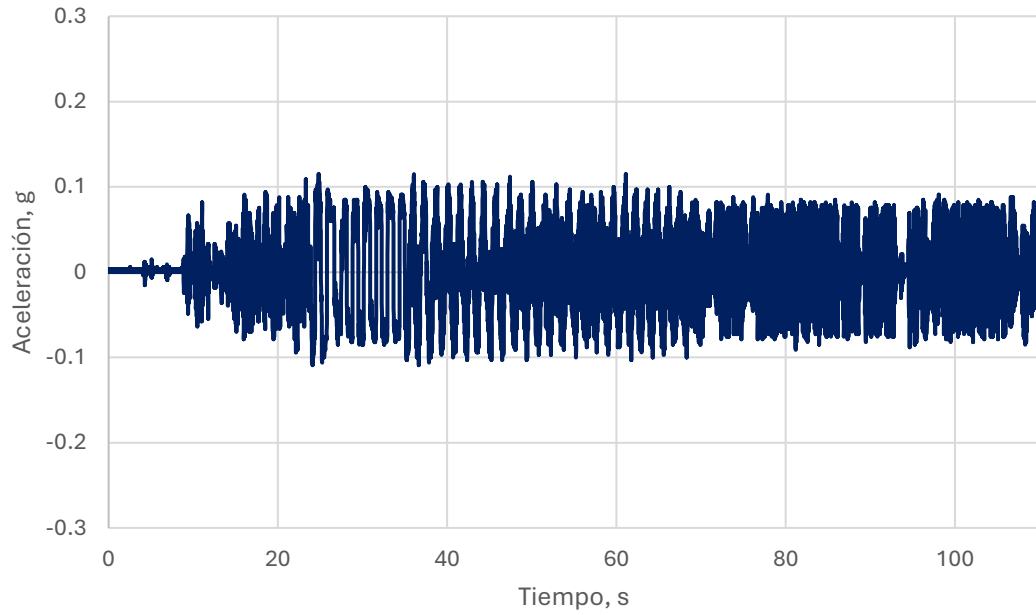


Figura 64. Registro de aceleraciones de CH05. Movimiento sísmico CH84.

### A.3. Movimiento sísmico SCT

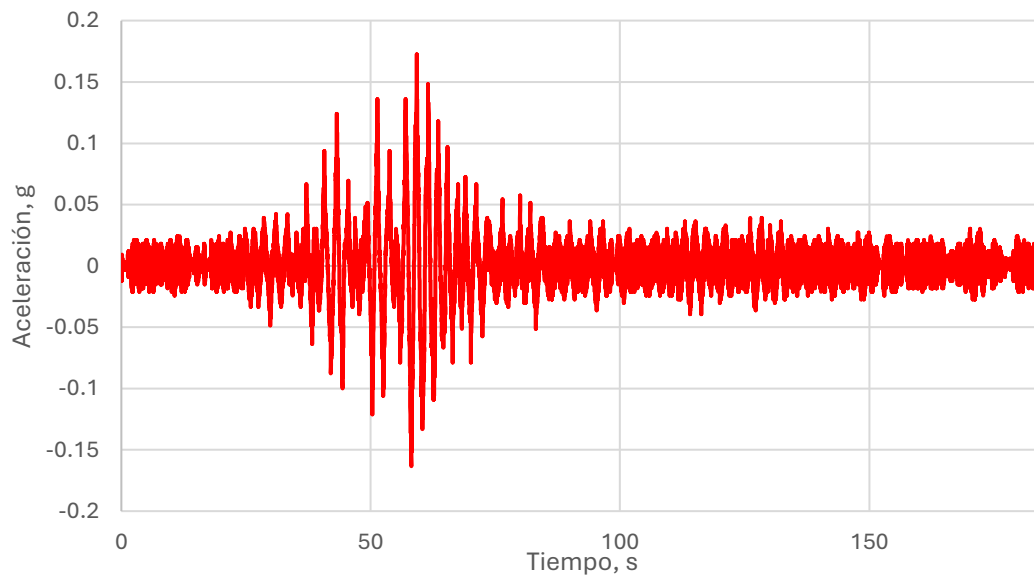
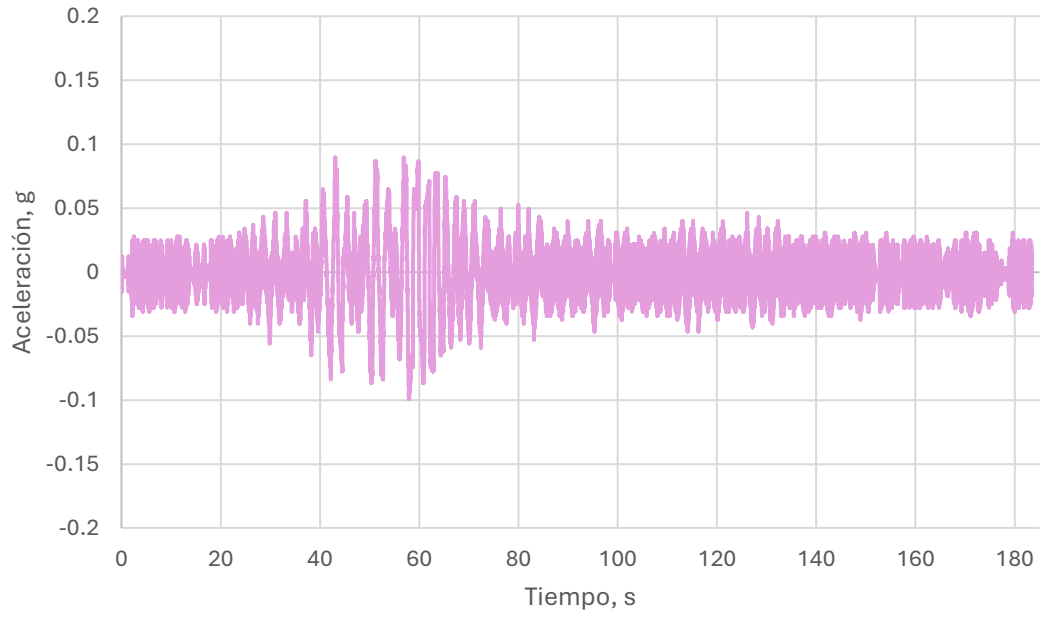
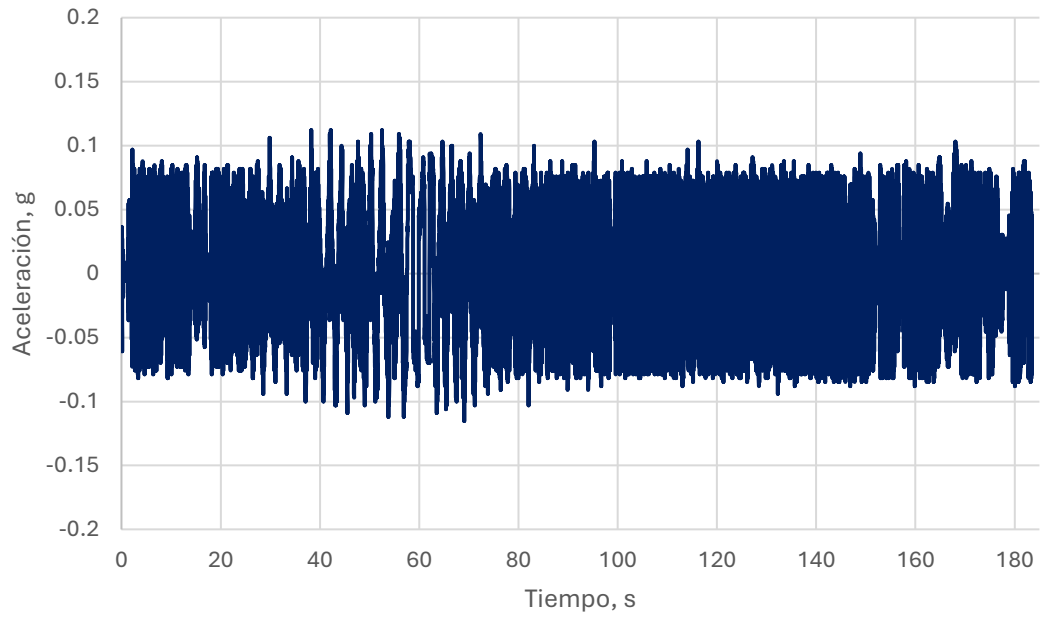


Figura 65. Registro de aceleraciones de CH01. Movimiento sísmico SCT.



*Figura 66. Registro de aceleraciones de CH02. Movimiento sísmico SCT.*



*Figura 67. Registro de aceleraciones de CH05. Movimiento sísmico SCT.*

## Anexo B. Desplazamientos laterales

### B.1. Movimiento senoidal

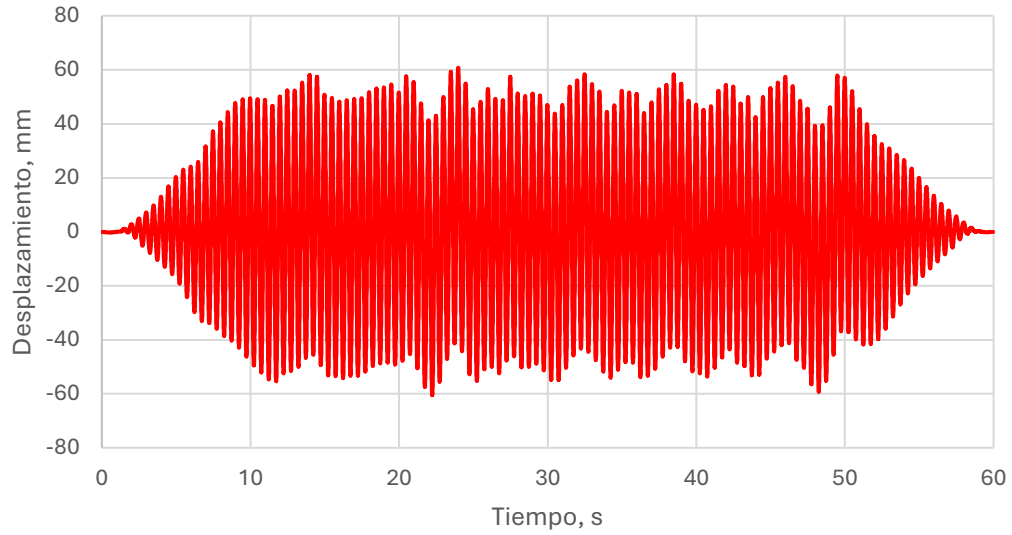


Figura 68. Historia de desplazamientos de CH01. Movimiento senoidal.

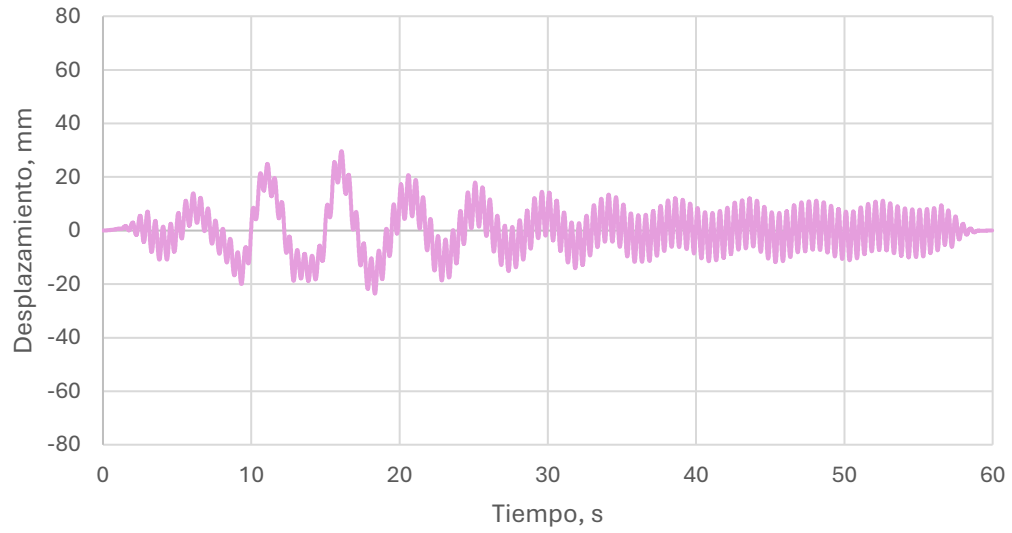


Figura 69. Historia de desplazamientos de CH02. Movimiento senoidal.

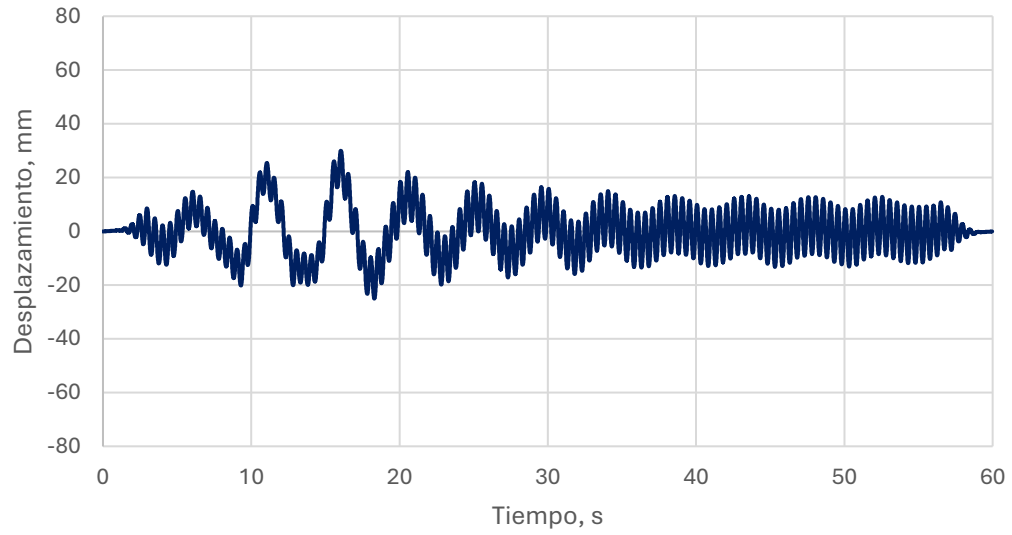


Figura 70. Historia de desplazamientos de CH05. Movimiento senoidal.

## B.2. Movimiento sísmico CH84

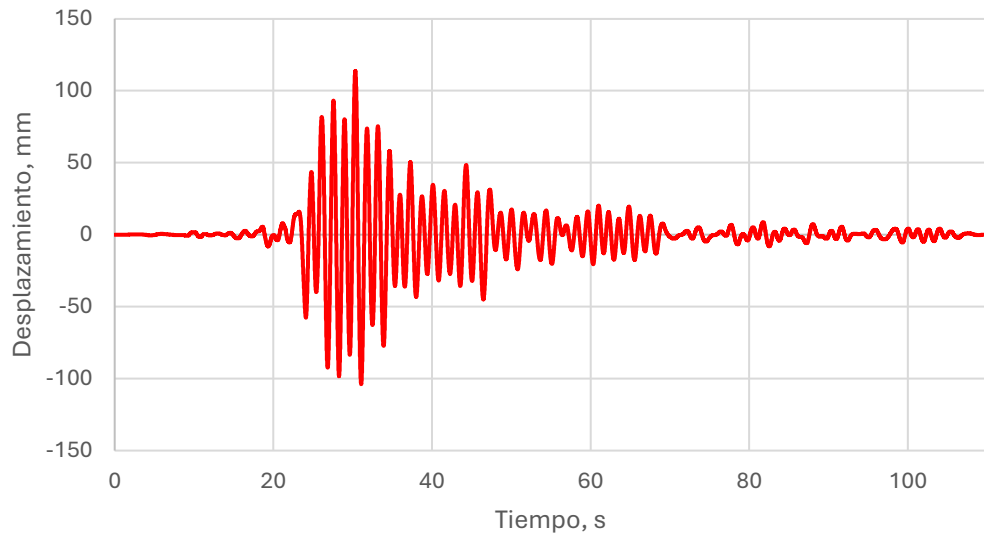


Figura 71. Historia de desplazamientos de CH01. Movimiento sísmico CH84.

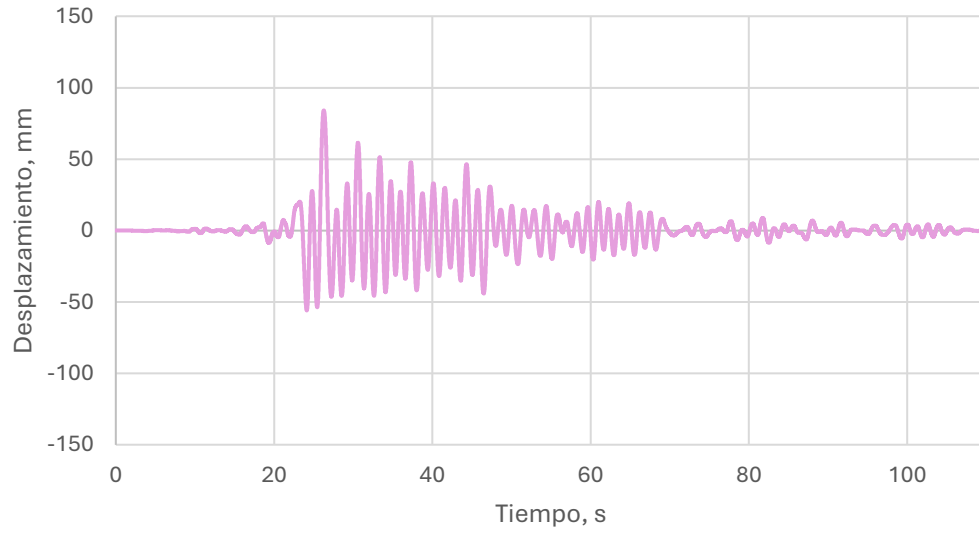


Figura 72. Historia de desplazamientos de CH02. Movimiento sísmico CH84.

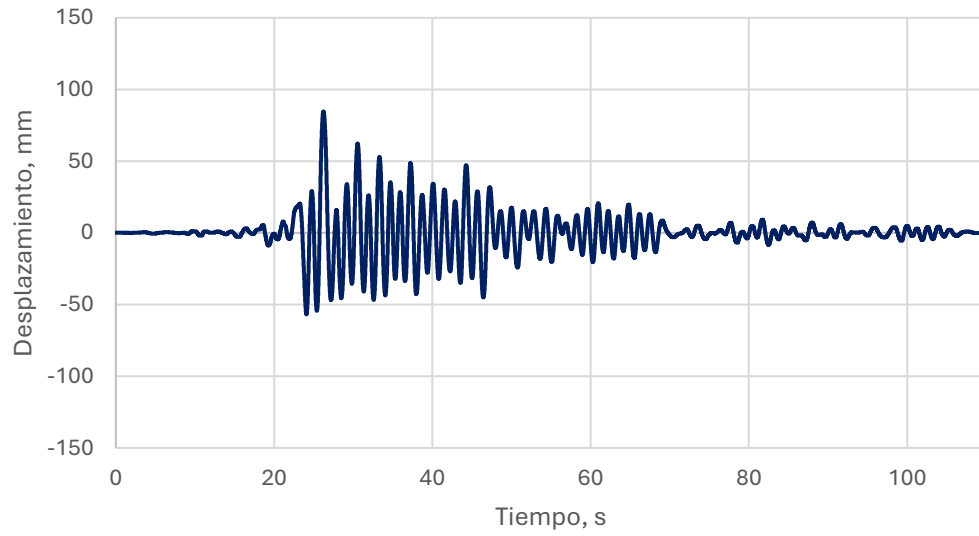


Figura 73. Historia de desplazamientos de CH05. Movimiento sísmico CH84.

### B.3. Movimiento sísmico SCT

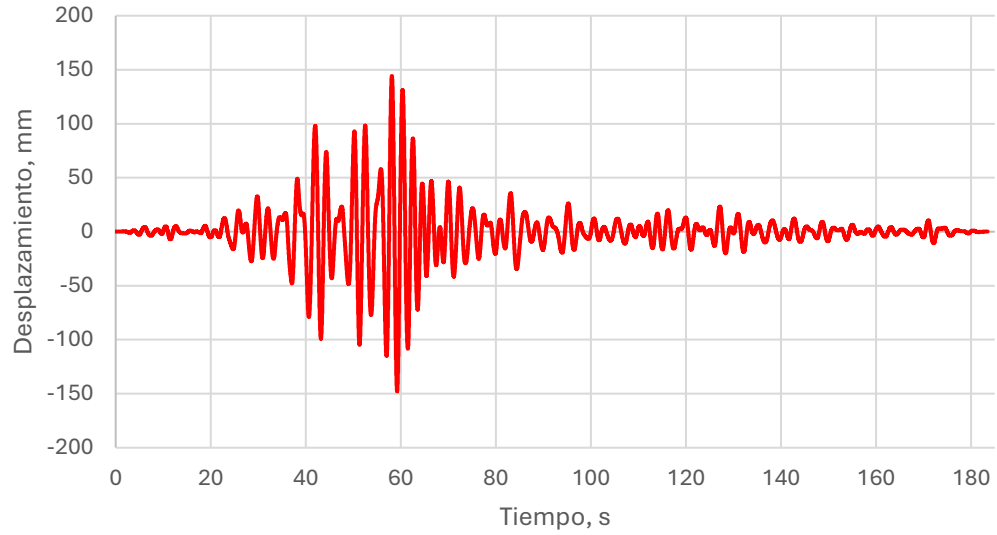


Figura 74. Historia de desplazamientos de CH01. Movimiento sísmico SCT.

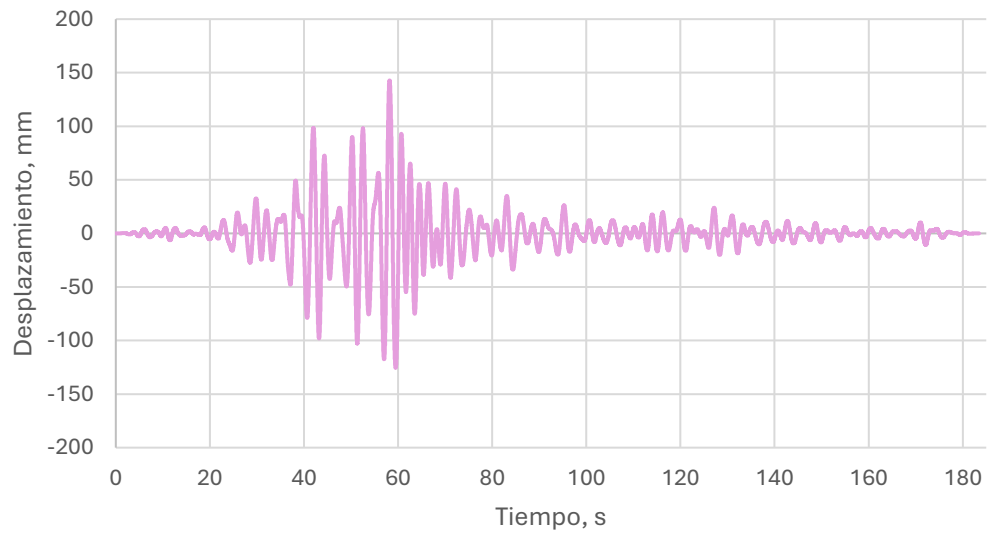
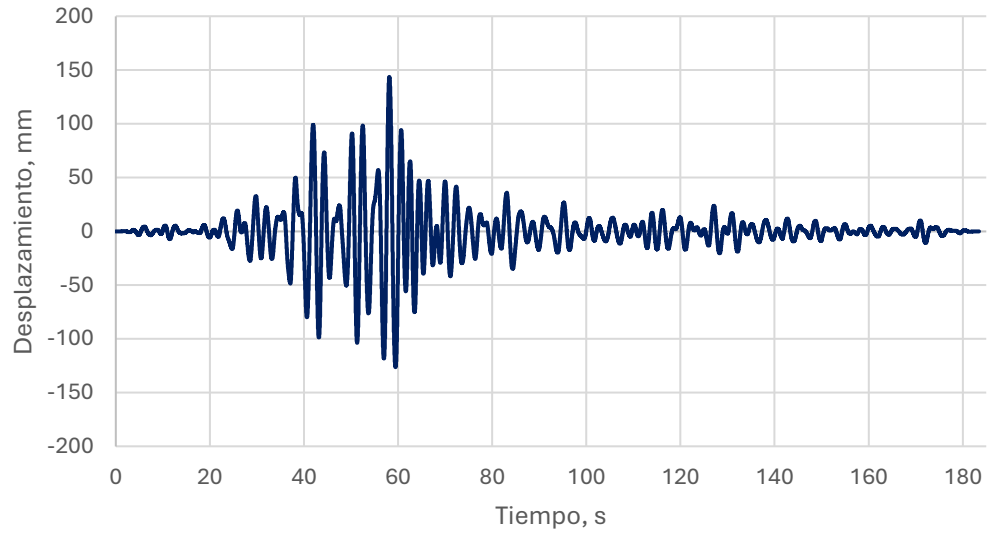


Figura 75. Historia de desplazamientos de CH02. Movimiento sísmico SCT.



*Figura 76. Historia de desplazamientos de CH05. Movimiento sísmico SCT.*

## Anexo C. Deslizamiento y desplazamiento relativo

### C.1. Ruido blanco

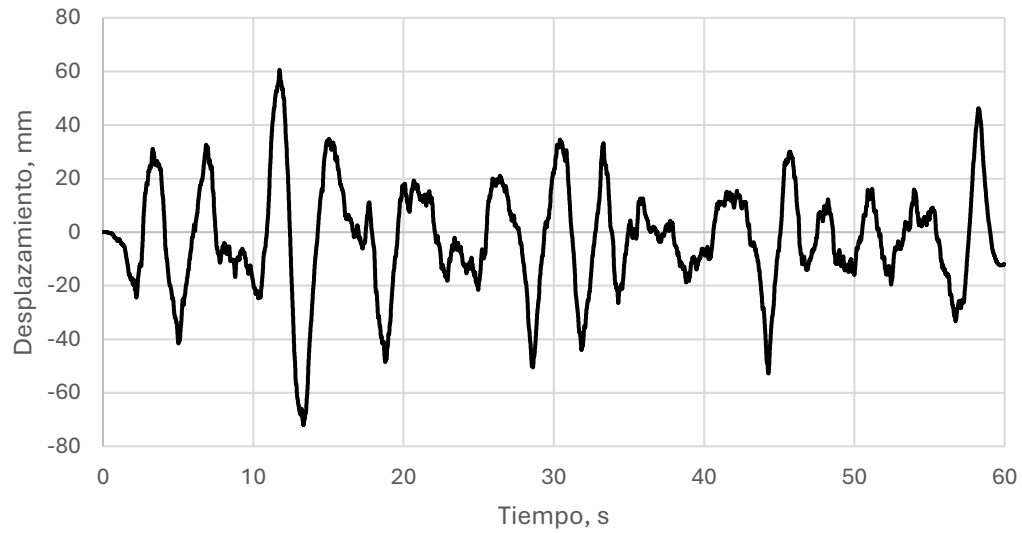


Figura 77. Deslizamiento entre CH01 y CH02. Ruido blanco.

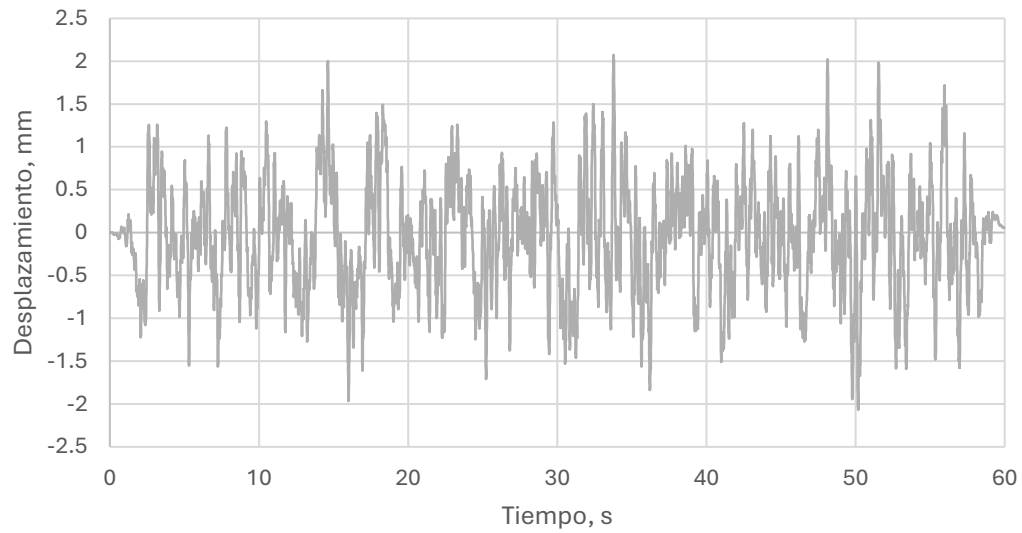


Figura 78. Desplazamiento relativo entre CH02 y CH05. Ruido blanco.

## C.2. Movimiento senoidal

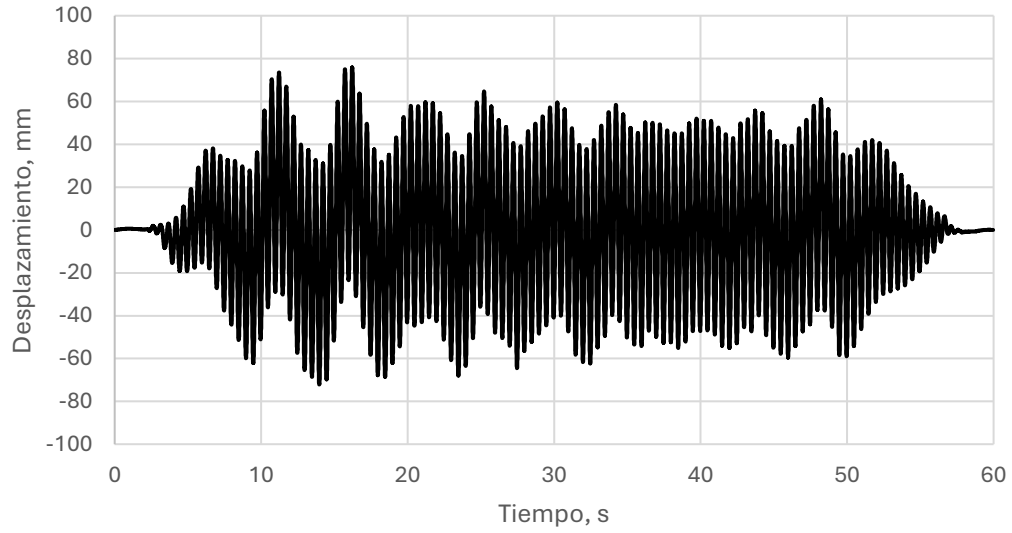


Figura 79. Deslizamiento entre CH01 y CH02. Movimiento senoidal.

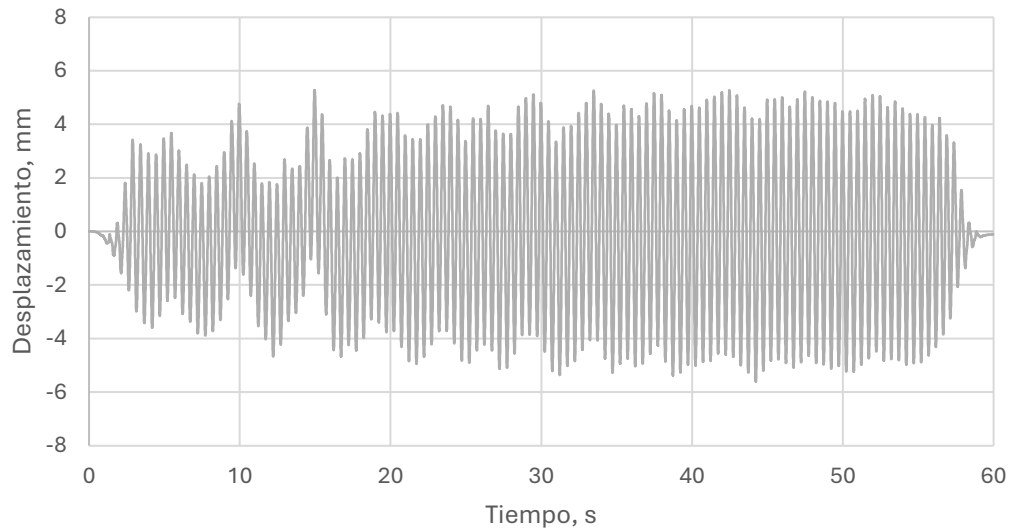


Figura 80. Desplazamiento relativo entre CH02 y CH05. Movimiento senoidal.

### C.3. Movimiento sísmico CH84

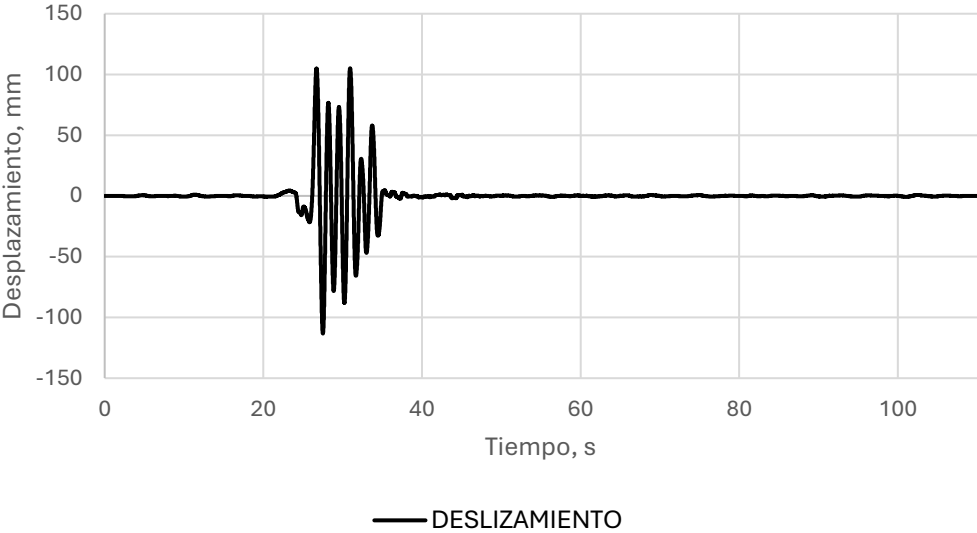


Figura 81. Deslizamiento entre CH01 y CH02. Movimiento sísmico CH84.

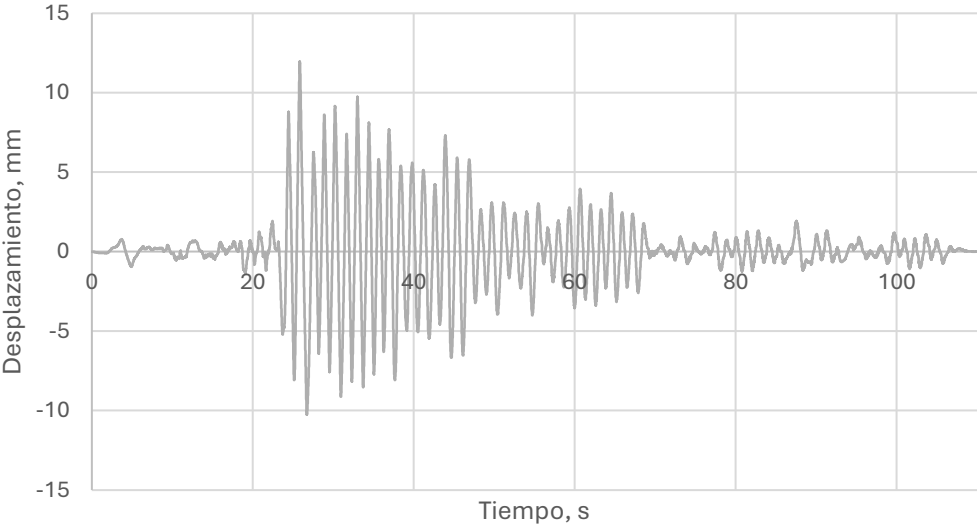


Figura 82. Desplazamiento relativo entre CH02 y CH05. Movimiento sísmico CH84.

## C.4. Movimiento sísmico SCT

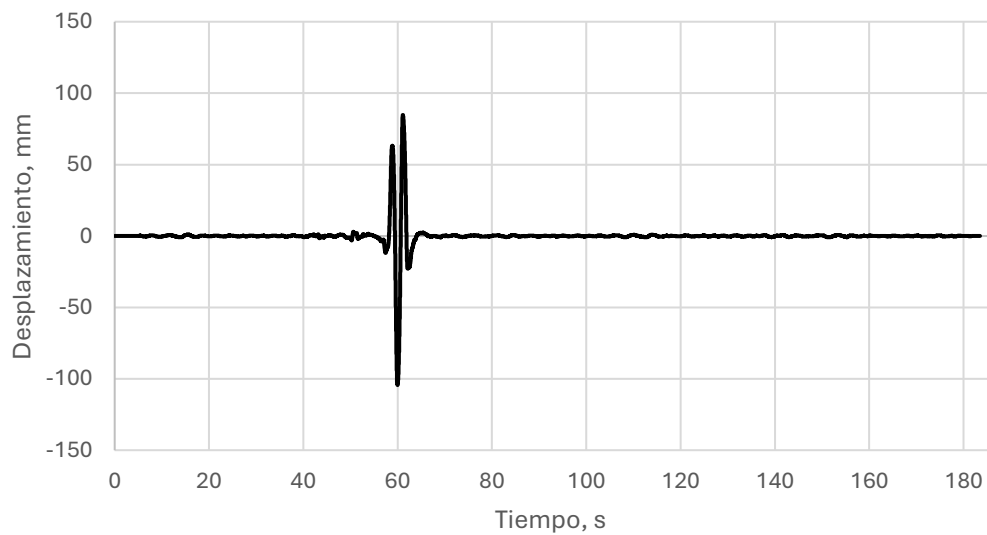


Figura 83. Deslizamiento entre CH01 y CH02. Movimiento sísmico SCT.

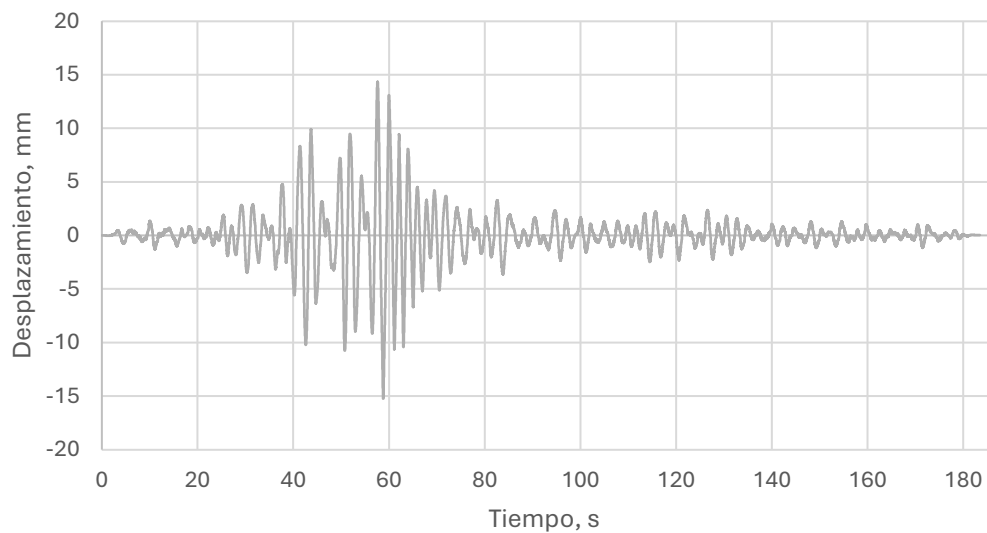


Figura 84. Desplazamiento relativo entre CH02 y CH05. Movimiento sísmico SCT.