



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio experimental de modelos físicos con
patologías estructurales representativas de
edificaciones de vivienda vulnerables ante
sismos**

TESINA

Que para obtener el título de
Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Itzel Jaqueline Hernández Salgado

DIRECTOR DE TESINA

M. I. Octavio García Domínguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

Contenido

Resumen	4
Introducción	5
Objetivos generales y específicos	6
Objetivo General	6
Objetivos Específicos.....	6
Capítulo 1. Antecedentes	7
1.1. Problemática	7
1.2. Estadísticas de daños	8
Capítulo 2. Alcances del proyecto	14
2.1. Alcances	14
Capítulo 3. Descripción de los modelos estructurales	15
3.1. Mesa vibradora	15
3.2. Modelo 0.....	16
3.3. Modelos 1, 2 y 3 (con entrepiso flexible).....	19
3.4. Modelos 4 y 5 (edificios de esquina)	20
Capítulo 4. Determinación experimental de las propiedades dinámicas de los modelos	23
4.1. Fundamentos de análisis de señales.....	23
4.2. Determinación de las propiedades dinámicas de los modelos.....	24
4.2.1. Modelo 0.....	25
4.2.2. Modelos 1, 2, 3, 4 y 5.....	31
Capítulo 5. Obtención de respuestas experimentales y numéricas	38
5.1. Acciones dinámicas aplicadas a los modelos físicos	38
5.2. Coherencia entre las señales de entrada y salida de la mesa vibradora	39
5.3. Instrumentación.....	40
5.4. Respuesta experimental de los modelos	41
5.5. Desarrollo de modelos numéricos	44
5.6. Frecuencias y modos de vibrar	45
5.7. Respuestas numéricas.....	46
Capítulo 6. Análisis de resultados	49
6.1. Comparación de las respuestas numérica y experimental	49
6.2. Propiedades dinámicas de los modelos.....	51
6.3. Respuesta experimental.....	51
6.4. Respuesta numérica.....	53
Capítulo 7. Conclusiones	55

7.1.	Conclusiones generales.....	55
7.2.	Conclusiones particulares	55
7.3.	Impacto del Servicio Social en mi formación académica y profesional	58
7.4.	Agradecimientos	59
	Referencias.....	60
	Anexos	61
	ANEXO 1. Fabricación de modelos estructurales físicos	61
	ANEXO 2. Material videográfico	63

Resumen

Dada la alta sismicidad que presenta nuestro país, se han evidenciado diversas vulnerabilidades estructurales en edificios de vivienda, especialmente aquellos de 4 a 6 niveles. El sismo del 19 de septiembre de 2017 (19S17) puso de manifiesto deficiencias comunes, como los cambios bruscos de rigidez a lo largo de la altura de los edificios, siendo particularmente crítica la configuración estructural conocida como “planta baja débil”. Esta condición, originada por requerimientos arquitectónicos como espacios de estacionamiento, reduce significativamente la rigidez lateral en planta baja, incrementando el riesgo de daños graves y hasta colapsos.

Ante esta problemática, el Departamento de Estructuras de la DICyG diseñó un proyecto educativo para el desarrollo y análisis experimental de modelos físicos en mesa vibradora, con el fin de caracterizar el comportamiento de edificaciones con dichas patologías estructurales, el cual fue desarrollado con el patrocinio del Programa PAPIIME “Instrumentación y ensaye en mesa vibradora de modelos físicos representativos de edificios con reducciones bruscas de rigidez lateral”, DGAPA UNAM (García, O y Pontón, J. A. 2024). Este proyecto, en el cual tuve la oportunidad de participar, estuvo orientado a fortalecer la formación de estudiantes de ingeniería civil, al complementar el uso de herramientas computacionales vistas en clase, con experiencias prácticas, promoviendo una comprensión más profunda del comportamiento sísmico real de las estructuras y fomentando una cultura de diseño responsable y resiliente en los egresados que se incorporan al ejercicio profesional, en beneficio de la numerosa infraestructura social que hay que mantener, rehabilitar y desarrollar.

Producto de mi participación en el programa de Servicio Social antes mencionado, en el cuerpo de este documento se presenta un informe detallado de las actividades que realicé, el cual he desarrollado para optar por la titulación bajo la modalidad de Servicio Social.

Introducción

Las condiciones de sismicidad que existen en gran parte del territorio nacional regularmente subordinan el diseño estructural de la mayoría de la infraestructura con la que contamos en los diversos sectores de la sociedad tales como educación, vivienda, industria, vías terrestres, entre otras. Por tal motivo las instituciones de educación superior del país requieren formar ingenieros civiles con sólidos conocimientos y capacidades, los cuales les permitan diseñar y construir estructuras con el nivel de seguridad que establece la normatividad vigente. Hoy más que nunca los avances en el estado del conocimiento y los desarrollos tecnológicos con que se cuenta han dado lugar a reglamentos más robustos, basados en principios de sostenibilidad, que tienen como objetivo lograr que las construcciones tengan un buen desempeño ante las diferentes acciones a las que pueden estar sujetas durante su vida útil, en especial las solicitaciones de tipo accidental como el sismo y el viento.

La ocurrencia de sismos de gran intensidad como el del 19 de septiembre de 2017 (S19-2017), cuyas características generaron amplificaciones importantes de la respuesta de suelo en zonas de transición con periodo dominante entre 0.5 y 1 s, ocasionó que los mayores daños se concentraron en construcciones de mediana altura, particularmente en aquellas destinadas a uso habitacional.

Muchas de las prácticas de construcción actuales siguen evidenciando la vulnerabilidad de algunas concepciones estructurales, que si bien satisfacen necesidades de espacio y funcionalidad en edificaciones para vivienda, generan patologías estructurales por cambios bruscos de rigidez lateral de un entrepiso a otro, induciendo un entrepiso flexible en el que se generan altas concentraciones de fuerzas y deformaciones importantes, que ocasionan graves daños en elementos estructurales y hasta el colapso de esas zonas. Es común que estas malas concepciones estructurales se presenten en la planta baja, por lo que se les conoce como “Planta baja débil”.

En la actualidad, el estudio del comportamiento dinámico de estructuras ante efectos sísmicos puede llevarse a cabo relativamente rápido, haciendo uso de herramientas computacionales, como equipos y programas de cómputo que permiten simular comportamientos complejos, siendo una opción viable debido a la accesibilidad que tienen las personas para contar con estos desarrollos. Sin embargo, el proceso de formación de estudiantes en ingeniería estructural requiere que el uso de estas herramientas tenga como antecedente un claro entendimiento de la física del problema, siendo altamente recomendable el uso de modelos físicos que les permitan sensibilizarse y comprender los fenómenos (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Con base en lo anterior, este informe describe mi participación como prestador del servicio social en un proyecto académico del Departamento de Estructuras de la División de Ingenierías Civil y Geomática, que ilustra el comportamiento dinámico de modelos estructurales físicos ensayados en mesa vibradora, con patologías estructurales asociadas a cambios bruscos de rigidez lateral en la altura, que intentan caracterizar algunas de las malas concepciones estructurales identificadas en la práctica para el diseño de edificaciones destinadas a vivienda, en particular, los denominados entrepisos flexibles y la planta baja débil.

Objetivos generales y específicos

Objetivo General

Mostrar mediante la elaboración de material didáctico y audiovisual el comportamiento dinámico de modelos estructurales físicos, representativos de edificios con patologías asociadas a cambios bruscos de rigidez lateral en su altura, como los entrepisos flexibles y la planta baja débil, mediante ensayos en mesa vibradora. El propósito es evidenciar malas concepciones estructurales comunes en edificaciones de vivienda, para mejorar la comprensión e impacto en la seguridad estructural.

Objetivos Específicos

1. Realizar una revisión documental para identificar las fallas estructurales más recurrentes y su localización en la CDMX, producto de los daños causados por el terremoto del 19 de septiembre de 2017.
2. Diseñar, instrumentar y ensayar modelos físicos, que representen configuraciones estructurales con variaciones bruscas de rigidez lateral en planta y elevación, para evaluar su respuesta ante excitaciones dinámicas.
3. Comparar la respuesta dinámica entre modelos físicos ensayados y modelos analíticos numéricos desarrollados con software especializado, para validar su comportamiento estructural ante sollicitaciones sísmicas reales o armónicas.
4. Generar material videográfico para que estudiantes de Ingeniería Civil puedan comprender el impacto de los fenómenos sísmicos en las estructuras.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1. Problemática

México es un país con una elevada actividad sísmica, ya que se encuentra en una de las zonas tectónicas más activas del mundo. Debido a esto, la ocurrencia de efectos sísmicos destructivos ha sido la base para establecer y mejorar las normativas de construcción para el desarrollo de la infraestructura de nuestro país. El terremoto ocurrido el 19 de septiembre de 2017, evidenció vulnerabilidades estructurales en edificios de baja a mediana altura (4 a 6 niveles), comúnmente usados en vivienda, donde la combinación entre la mala concepción estructural, dada por sus cambios bruscos de rigidez, así como las similitudes entre las propiedades dinámicas de las estructuras y de los sitios donde se encuentran desplantadas, generaron fenómenos de amplificación de su respuesta sísmica, ocasionando graves daños y hasta colapsos.

Entre las patologías estructurales más recurrentes en estos edificios destaca la configuración que combina el uso de marcos de concreto reforzado en planta baja con muros de mampostería en los niveles superiores. Esta concepción estructural nace de la necesidad arquitectónica de crear espacios libres para estacionamiento, sin embargo, genera reducciones bruscas de rigidez lateral que provocan una gran flexibilidad en planta baja, induciendo el fenómeno denominado “planta baja débil”. Este fenómeno fue responsable de aproximadamente 24 colapsos en la Ciudad de México durante el sismo del 2017, de acuerdo con el “Visualizador de inmuebles con daños en México”, una plataforma desarrollada por la empresa especializada en ingeniería sísmica “SÍSÉ” (SÍSÉ, 2025). Producto de las experiencias se emitieron diversas actualizaciones del reglamento de construcciones de la ciudad de México y sus Nomas Técnicas Complementarias (NTC), siendo las más recientes las NTC-2023, en las que se hicieron más rigurosos los requerimientos de diseño sísmico para este tipo de construcciones.

Una de las actividades más relevantes posteriores a un sismo es la evaluación de los daños estructurales; después del sismo del 19 de septiembre del 2017 la División de Ingenierías Civil y Geomática de la Facultad de Ingeniería llevó a cabo visitas de inspección ocular en diversas localidades, con el propósito de valorar las condiciones estructurales de las edificaciones y contribuir a garantizar la seguridad de la población residente.

- Se hizo la inspección visual detallada y el levantamiento de daños en cédulas de evaluación estructural, de 91 edificios y complejos en 8 Facultades, 3 Preparatorias y una Unidad de Posgrado, con el apoyo de 108 profesores y 78 alumnos, de nivel licenciatura y especialización, de la Facultad de Ingeniería.
- Además, de 5 Unidades Médicas Familiares del IMSS, 20 edificios habitacionales del fraccionamiento Girasoles en Villa Coapa, 75 viviendas en Iztapalapa, 25 viviendas en Tulyehualco, 25 edificios en el fraccionamiento Tepozanes del Edo. De México, 8 edificios en las colonias Roma-Condesa, 20 viviendas en la Delegación Magdalena Contreras; todo ello con un grupo de 40 profesores y 500 alumnos.

En las siguientes figuras se presentan algunas fotografías de la participación de los alumnos de la División de Ingenierías Civil y Geomática en apoyo a la sociedad después de la ocurrencia del sismo de septiembre de 2017, coordinados por el Departamento de Estructuras, (Gaceta Digital de la Facultad de Ingeniería, UNAM. No. 14, 2017).



Figura 1.1. Alumnos de la FI, UNAM haciendo revisiones estructurales después del 19S17.



Figura 1.2. Daños estructurales identificados en un edificio de vivienda por el 19S17.

1.2. Estadísticas de daños

Para los fines de este proyecto, se llevó a cabo una revisión de las estadísticas de daño y/o colapsos generados por sismos de gran intensidad ocurridos en la Cd de México, utilizando el "Visualizador de inmuebles con daños en México", una plataforma desarrollada por la empresa especializada en ingeniería sísmica "SÍSÉ" (SÍSÉ, 2025). Este sitio permite desplegar y visualizar información de bases de datos con datos geográficos, como polígonos y puntos, ofreciendo una visión del alcance de eventos naturales de alto riesgo y del estado de afectación de los inmuebles.

En relación con el sismo de 2017, la información proporcionada abarca la zona centro del país, específicamente la Ciudad de México, el Estado de México y Puebla, mostrando inmuebles y áreas de daño. Además, se incluye información sobre los sismos ocurridos en la Ciudad de México en los años 1985, 1979 y 1957.

Los datos disponibles incluyen detalles sobre la localización de los inmuebles (calle, colonia y alcaldía), tipo y uso del edificio, año estimado de construcción, número de pisos, una breve descripción del sistema estructural, periodo estimado de la estructura (T_e) y del suelo (T_s), así como el cociente T_e/T_s y una descripción del estado actual.

Asimismo, se presentan evidencias fotográficas que documentan el estado de los edificios antes y después del sismo, en las que se identifican fallas estructurales inducidas por diversas patologías como la planta baja débil, figs. 1.3 a 1.5.

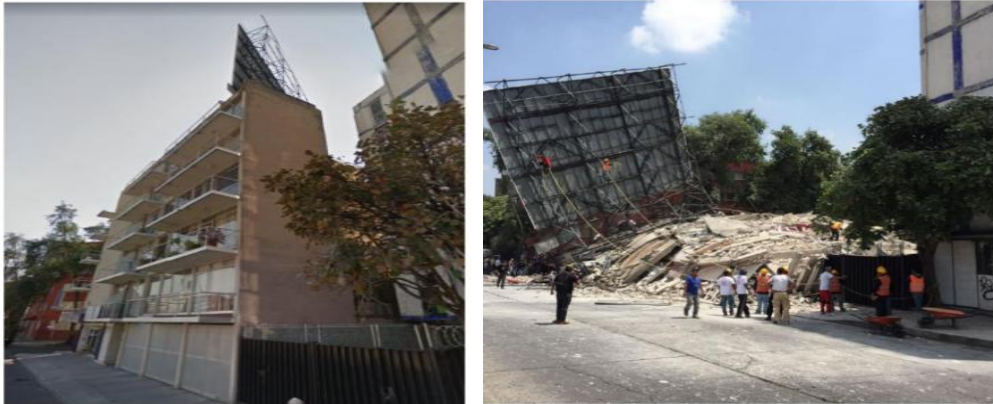


Figura 1.3. Edificación antes y después del sismo de 2017 (SÍSÉ, 2025).



Figura 1.4. Edificación antes y después del S19-2017, falla por planta baja débil (SÍSÉ, 2025).



Figura 1.5. Edificación después del S19-2017, falla por planta baja débil (SÍSÉ, 2025).

Las estadísticas de daños y colapsos del S19-2017 muestran que la mayoría de los colapsos se registraron en edificios de menos de 10 pisos, (Berrón, 2018). Se estima que un gran porcentaje de estos edificios ya habían soportado el sismo de magnitud 8.1 del 19 de septiembre de 1985 que causó graves daños en las edificaciones de la Cd de México, sobre todo aquellas desplantadas sobre suelo blando.

Entre las características comunes de estos edificios se destaca el uso de un sistema estructural a base de marcos de concreto reforzado en la planta baja, ante la necesidad de contar con espacios libres para estacionamiento y muros de mampostería en los niveles superiores para uso habitacional, característica estructural que induce la llamada "planta baja débil".

A continuación, se presenta la estadística del número de edificios colapsados en función del número de niveles, lo cual permite identificar el tipo de edificaciones más afectadas, fig. 1.6.

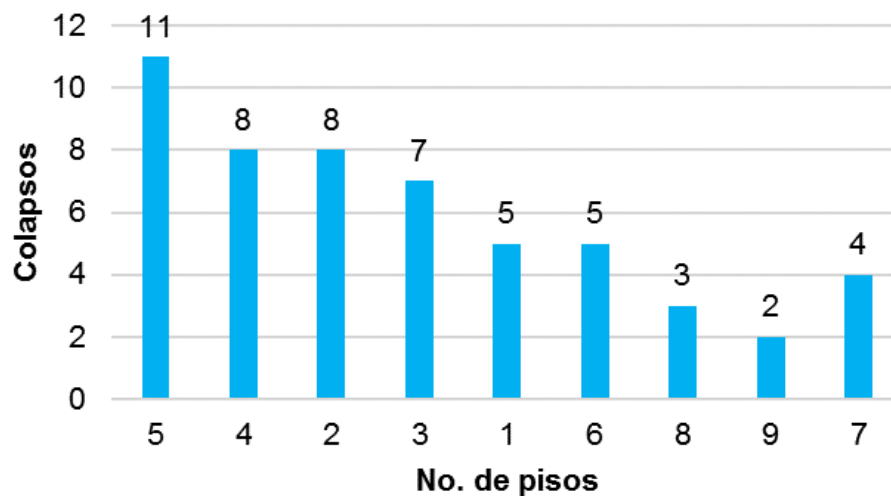


Figura 1.6. Colapsos por Número de niveles.

Adicionalmente se hizo una clasificación del daño de acuerdo con el tipo de sistema estructural. Como se observa en la fig. 1.7, las mayores afectaciones se concentraron en construcciones con un sistema estructural a base de "columnas y losa plana de concreto", resultado que concuerda con las estadísticas de daño en sismos de gran intensidad como el ocurrido en 1985. El principal problema en estas edificaciones está asociado a la deficiente rigidez lateral que aporta el sistema losa-columna ante movimientos sísmicos, situación que es similar a la que posee la planta baja débil, aunado al daño en muros de mampostería confinada y no confinada. Sin embargo, otro tipo de daños importantes se reportan en muros de mampostería confinada comunes en edificaciones para vivienda.

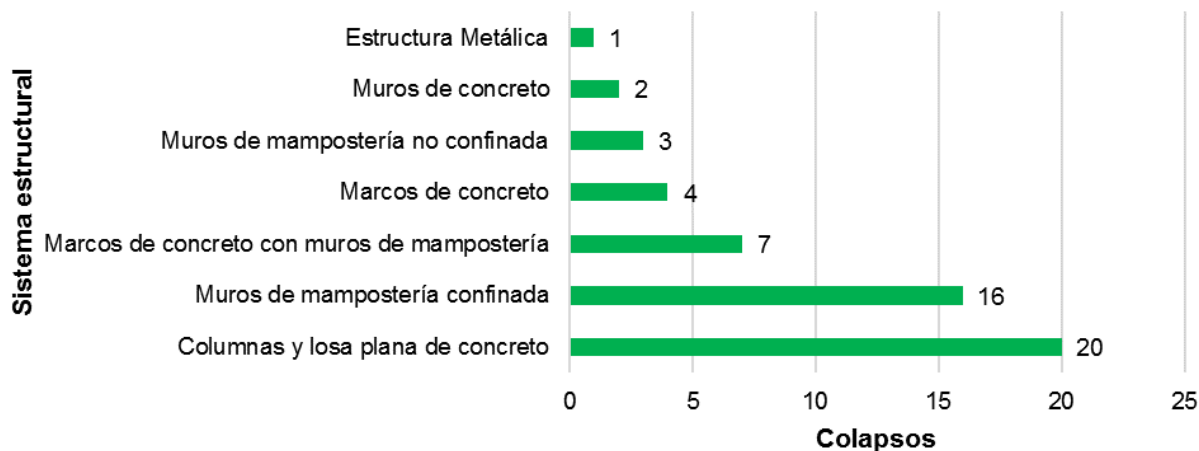


Figura 1.7. Colapsos por sistema estructural.

En la fig. 1.8 se puede observar un comparativo de los colapsos en el S19-2017 de los edificios construidos antes o después de 1985. Estos resultados hacen evidente las mejoras en el incremento de la seguridad estructural producto de mejoras en la estimación de las demandas sísmicas y del diseño estructural.

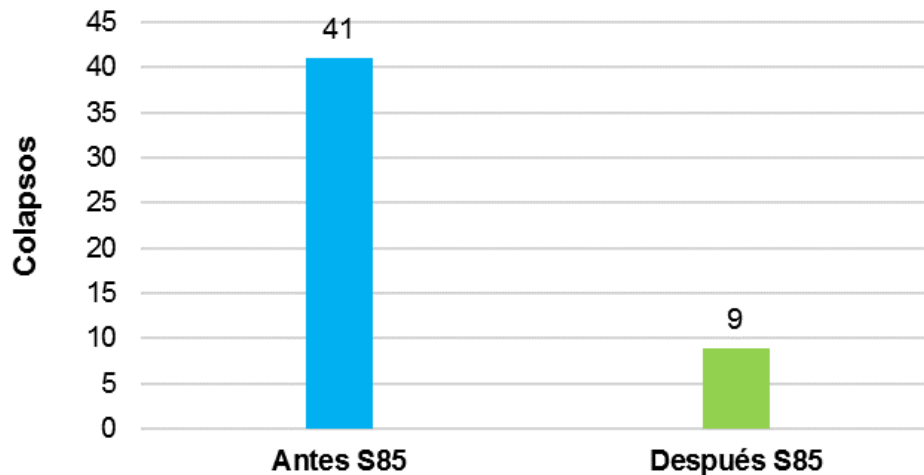


Figura 1.8. Colapsos ocurridos en el S19-2017 para edificaciones construidas antes y después del sismo de 1985.

La fig. 1.9 muestra los tipos de edificios dañados según su uso a causa del S19-2017. Como se observa, los edificios con uso habitacional son los que tuvieron la mayor estadística de daños, asociados principalmente a los sistemas estructurales con los que fueron concebidos. En estos casos es una práctica común la existencia de la planta baja débil.

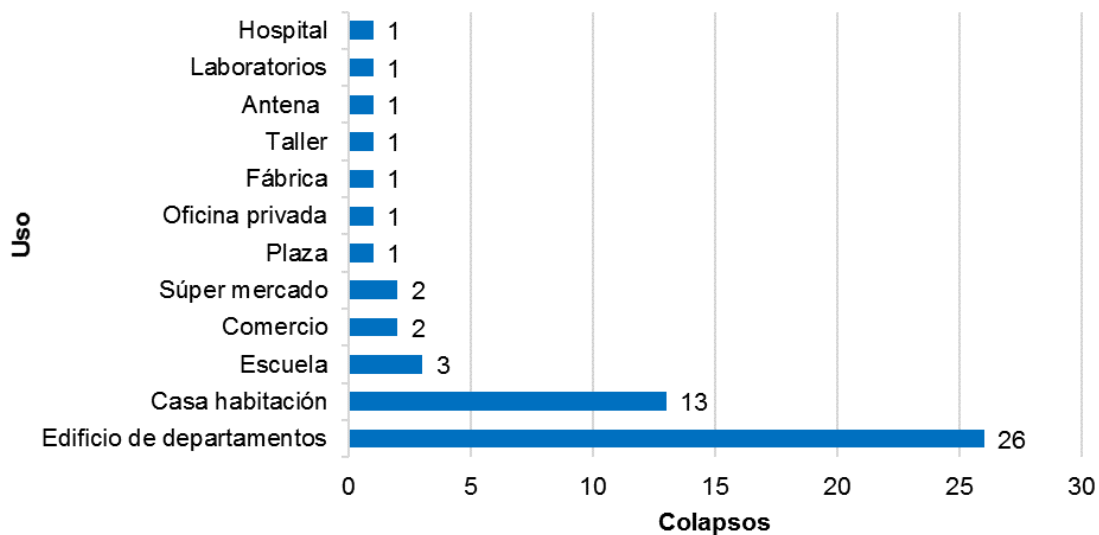


Figura 1.9. Clasificación del colapso en función del uso de edificios del 2017.

En la fig. 1.10 se presenta la distribución de daños en edificaciones de acuerdo con su localización por alcaldía de la Ciudad de México. Se puede observar que en la alcaldía Benito Juárez fue donde se concentró el mayor número de colapsos la cual, de acuerdo con la zonificación geotécnica de la Ciudad, está localizada en las zonas II y III, registrándose el mayor número de colapsos en la frontera entre estas.

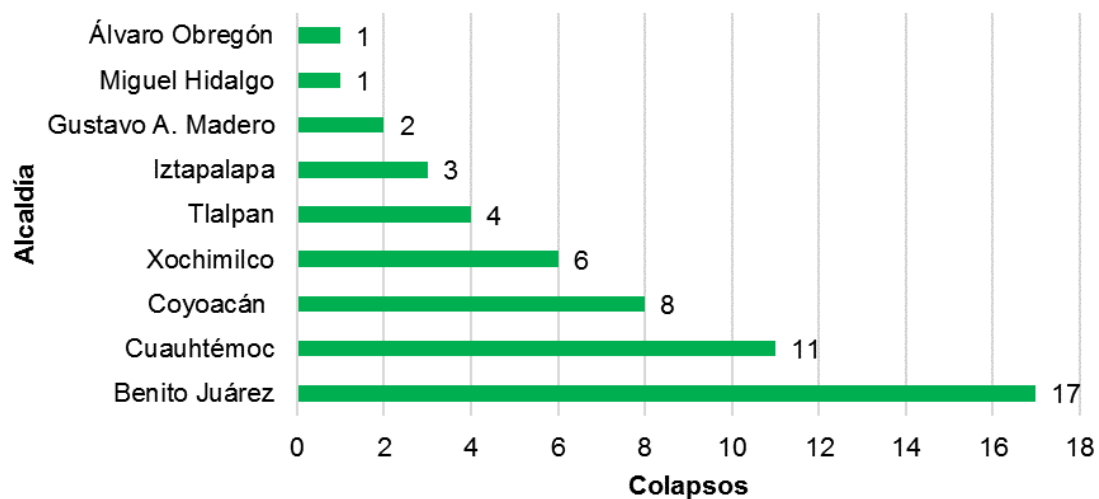


Figura 1.10. Clasificación del colapso de edificios por alcaldía en el S19-2017.

De la revisión estadística de daño y/o colapsos generados por sismos de gran intensidad, en particular el ocurrido en la Cd. de México como el del 19 de septiembre de 2017, se pueden destacar los siguientes resultados, (SÍSÉ, 2025):

- El mayor porcentaje de colapsos ocurrió en edificios de 5 pisos
- El tipo de sistema estructural que presentó los mayores daños y/o colapsos fue el de “columnas y losas planas de concreto”, seguido del sistema de “muros de mampostería confinada”
- El colapso de edificaciones construidas antes de 1985 fue de 4.5 veces mayor que el de las construidas después de 1985.
- Según su uso, el 49 % de las estructuras colapsadas en el S19-2017, fueron “edificios de departamentos”.
- Las Alcaldías con el porcentaje más alto de colapsos fue Benito Juárez con 32%, seguido de Cuauhtémoc y Coyoacán con 20% y 15 % respectivamente.

Los resultados hacen evidente que el S19-2017, generó los mayores colapsos a sistemas estructurales con baja planta débil, en particular aquellas construidas antes de 1985, de mediana altura, destinados para vivienda (edificios de departamentos).

Capítulo 2. Alcances del proyecto

2.1. Alcances

El programa de servicio social del departamento de Estructuras de la DICyG, ha fortalecido su apoyo para la atención de solicitudes de la población, cuyas viviendas sufrieron daños estructurales ocasionados por el sismo del 19 de septiembre de 2017. A través del análisis de reportes elaborados por la DICyG y otras fuentes digitales, tuve la oportunidad de conocer de manera detallada las zonas más afectadas y las condiciones en las que se encontraban muchas de las edificaciones ubicadas en la Ciudad de México y comunidades cercanas.

Mis actividades dentro del programa iniciaron con una recopilación de información documental sobre los daños ocurridos en las edificaciones con uso habitacional producto del sismo del 19 de septiembre de 2017; tarea necesaria para crear la concepción y el diseño de los modelos físicos y numéricos, con los que se realizó una evaluación analítica y experimental del comportamiento sísmico de los mismos, quedando documentada para su difusión y uso a través de medios virtuales.

Uno de los principales aportes del programa fue el desarrollo de seis modelos físicos estructurales, que incluyeron patologías estructurales comúnmente observadas en edificaciones de vivienda de la Ciudad de México; las cuales se manifestaron como malas concepciones estructurales después del sismo del 19 de septiembre del 2017, debido a que fueron responsables de múltiples colapsos estructurales. Estos modelos físicos, fueron sometidos a ensayos dinámicos haciendo uso de una mesa vibradora, además de ser analizados numéricamente mediante herramientas computacionales, todo esto permitió obtener una caracterización exhaustiva de su respuesta sísmica.

Los resultados obtenidos servirán para la comprensión de mecanismos de daño y colapso en estructuras de vivienda, principalmente para las que se encuentran ubicadas en zonas consideradas como de “alto riesgo sísmico”; particularmente durante el 19S17 se observó una amplificación importante en suelos de transición, causando un mayor número de colapsos.

Por otro lado, documentar los resultados de forma audiovisual, sirvió para generar material con un alto valor educativo, el cual puede ser utilizado en actividades de capacitación, docencia y divulgación en diversas instituciones educativas del país, en las carreras de Ingeniería Civil y Arquitectura. De esta manera, el programa de servicio social fortalece la formación académica y fomenta una cultura de prevención en el ámbito del diseño y la construcción de edificaciones de vivienda de baja a mediana altura.

Capítulo 3. Descripción de los modelos estructurales

3.1. Mesa vibradora

En el ámbito de la investigación, los ensayos en mesa vibradora han permitido estudiar la respuesta de modelos físicos a escala, ante acciones dinámicas inducidas en su base. Como ejemplo de esto tenemos los modelos construidos en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en la mesa vibradora de la Universidad de San Diego, California y en la E-Defense de Japón. Sin embargo, estos equipos también son muy útiles en el ámbito docente, pues permiten mostrar a los alumnos el comportamiento de las estructuras y validar los principios o conceptos teóricos vistos en clase.

La mesa vibradora del laboratorio de materiales, fig. 3.1, se construyó mediante el patrocinio de la Sociedad de Exalumnos de la Facultad de Ingeniería (SEFI), para el Departamento de Estructuras de la División de Ingenierías Civil y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.



Figura 3.1. Estructura de la mesa vibradora.

La Mesa Vibradora es un equipo servo-hidráulico de lazo cerrado, capaz de generar movimientos controlados en una plataforma de 2 m² que soporta modelos de hasta 250 kg. Cuenta con una carrera total de 12 pulgadas y opera en frecuencias que van de 0.2 a 10 Hz. Su funcionamiento se basa en un actuador hidráulico controlado por una servo-válvula, alimentado por una unidad hidráulica de potencia de 10 HP y 2200 psi, complementado con intercambiador de calor, acumulador y sistema de lubricación.

El sistema se compone de tres elementos principales: la estructura mecánica (cimentación, guías y plataforma de aluminio), el sistema hidráulico (unidad de potencia, pistón y válvulas) y el sistema de control (banco móvil con gabinete de tarjetas, computadora con Windows 10 y tarjeta de adquisición de datos). El equipo de control tiene capacidad para conectar hasta 28 canales de transductores, aunque inicialmente se entrega habilitado para 12. Estos canales permiten trabajar

con galgas extensométricas en diferentes configuraciones, celdas de carga, sensores de presión, acelerómetros y transductores de salida en voltaje, (Laboratorio de Materiales, 2019).

Por otro lado, en el área de la electrónica se destaca el desarrollo que se ha generado en la fabricación de sensores para el monitoreo de diversos fenómenos físicos, entre ellos las vibraciones inducidas sobre sistemas estructurales. Para la instrumentación de modelos estructurales a escala, actualmente es posible contar con sensores asequibles como los acelerómetros micro electromecánicos mejor conocidos como MEMS, por sus siglas en inglés (Micro Electro Mechanical System), los cuales se utilizaron en este proyecto para determinar las propiedades dinámicas de los modelos a estudiar y su respuesta ante registros sísmicos reales.

3.2. Modelo 0

El modelo estructural de referencia o “Modelo 0” posee 3 niveles con alturas de entrepiso de 30 cm y una altura total de 90 cm. El sistema estructural consiste en losas planas de acrílico de 6 mm de espesor, apoyadas en columnas de policarbonato sólido (lexan) de sección transversal cuadrada de 0.6 cm x 0.6 cm, figs. 3.2 y 3.3. Para la unión de las columnas con el sistema de piso se diseñó e imprimió en 3D una conexión plástica atornillada, fig. 3.4.



Figura 3.2. Modelo físico de referencia (Modelo 0).

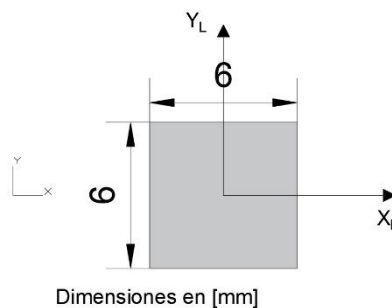


Figura 3.3. Sección transversal de las columnas.



Figura 3.4. Conexión columna-losa.

El modelo cuenta con 2 crujías en dirección longitudinal y una en dirección transversal; el sistema de piso tiene dimensiones en planta de 30 cm x 40 cm, ocupando una superficie total de 120 cm², figs. 3.5 y 3.6.

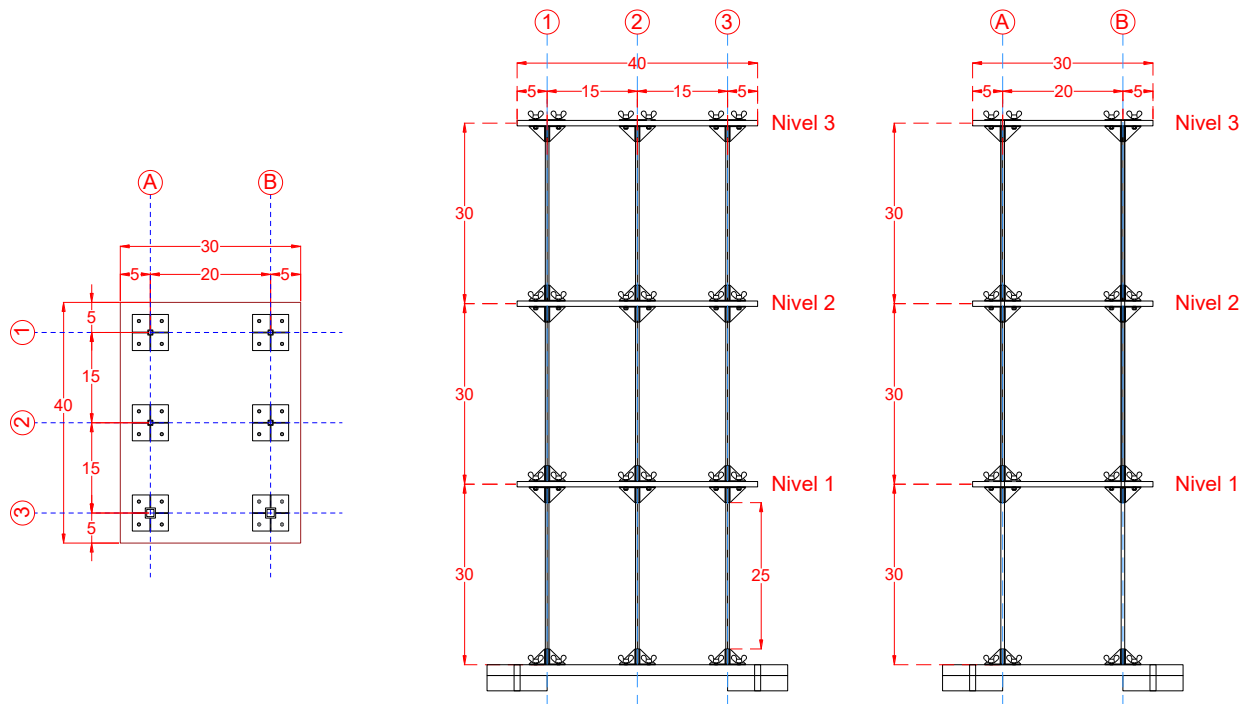


Figura 3.5. Geometría del Modelo 0. Vista en planta y elevación, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

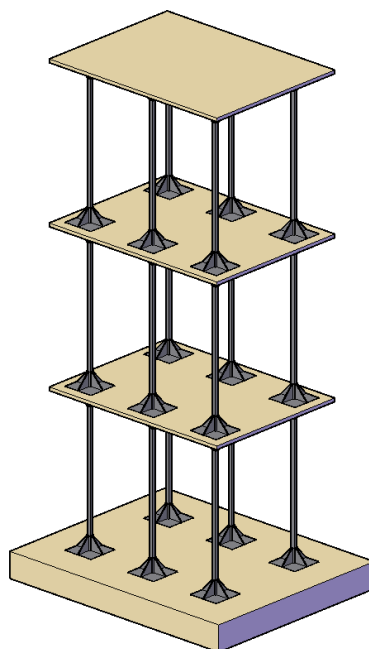


Figura 3.6. Isométrico del modelo de referencia (Modelo 0), .

Las propiedades mecánicas de los materiales con los cuales está fabricado el modelo fueron obtenidas a partir de ensayos experimentales realizados en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería y de información extraída de fichas técnicas proporcionadas por los proveedores, fig. 3.7 y tabla 3.1.

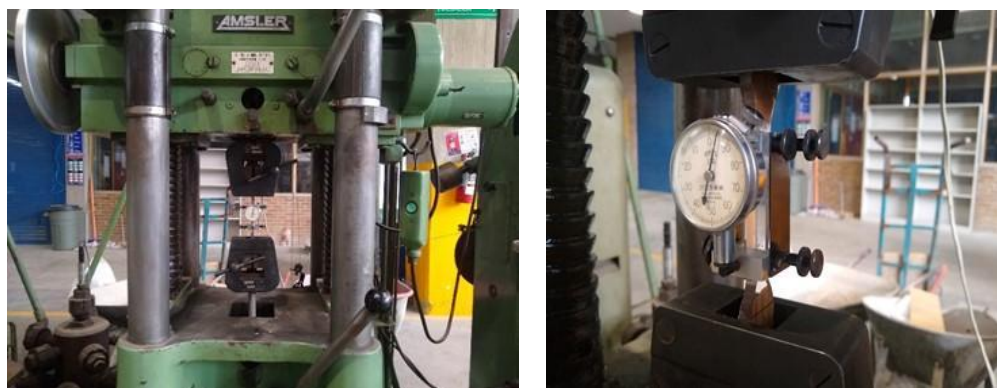


Figura 3.7. Ensaye a tensión de probeta de policarbonato sólido, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Tabla 3.1 Propiedades físicas de los materiales, (Pontón, J.A., 2020).

Elemento estructural	Material	$\gamma \left(\frac{kgf}{cm^3} \right)$	$E \left(\frac{kgf}{cm^2} \right)$	ν
Columnas	Policarbonato sólido	1200	25000	0.37
Losas	Acrílico	1190	31627	0.37

Donde:

γ es el peso volumétrico del material

E es el módulo de elasticidad

ν es la relación de Poisson

La carga muerta de los modelos incluyó el peso propio de losas, columnas y conexiones, fig. 3.8.



Figura 3.8. Peso de elementos de las conexiones.

3.3. Modelos 1, 2 y 3 (con entrepiso flexible)

Se construyeron 3 modelos con entrepiso flexible colocando muros de acrílico de 1.5 mm de espesor en los ejes perimetrales de dos entrepisos, con lo que se generaron tres variantes de entrepiso flexible, los cuales se identificaron como modelos 1, 2 y 3, figs. 3.9 a 3.11.

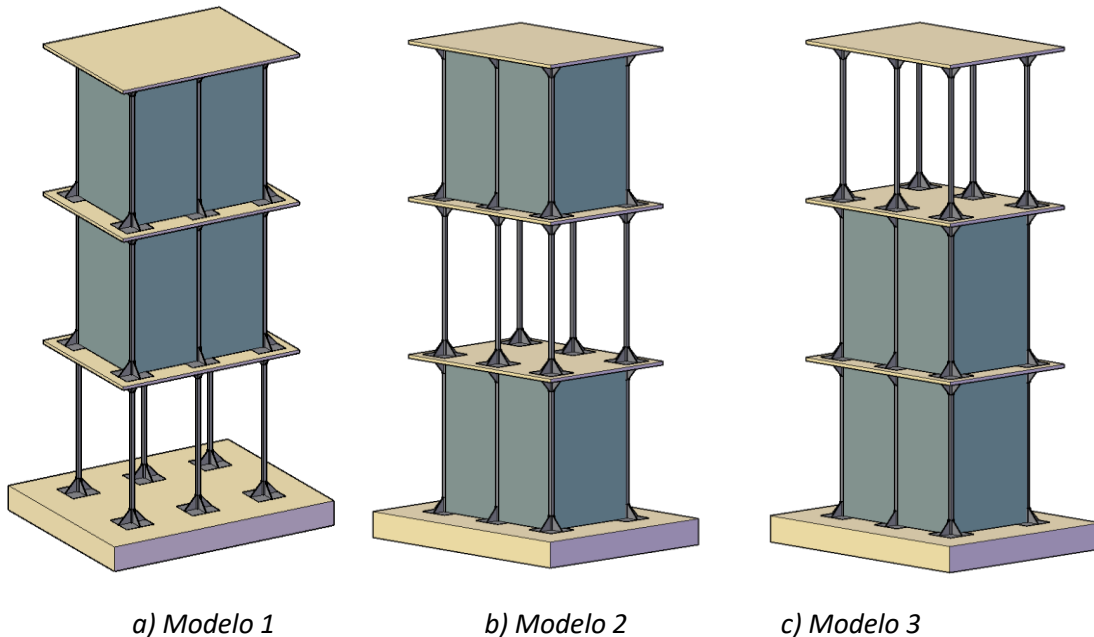


Figura 3.9. Isométrico de los modelos con entrepiso flexible.

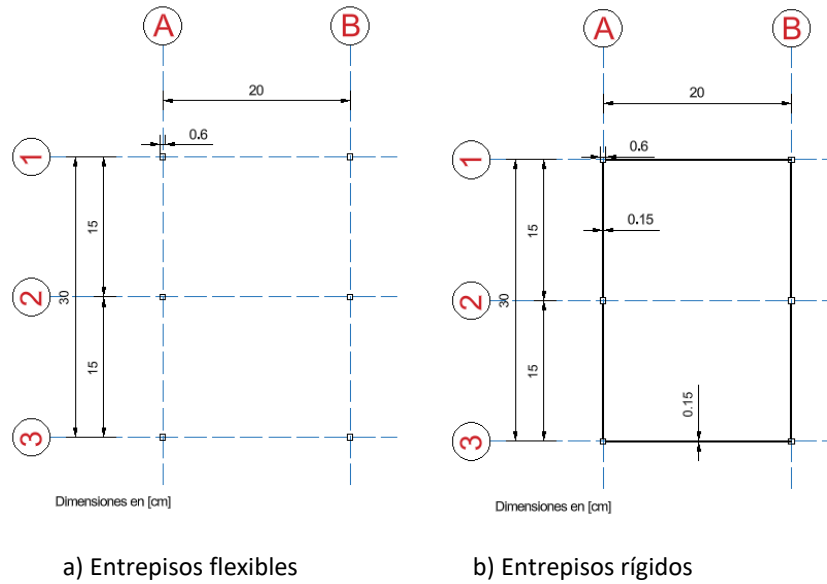


Figura 3.10. Configuración en planta de los modelos.

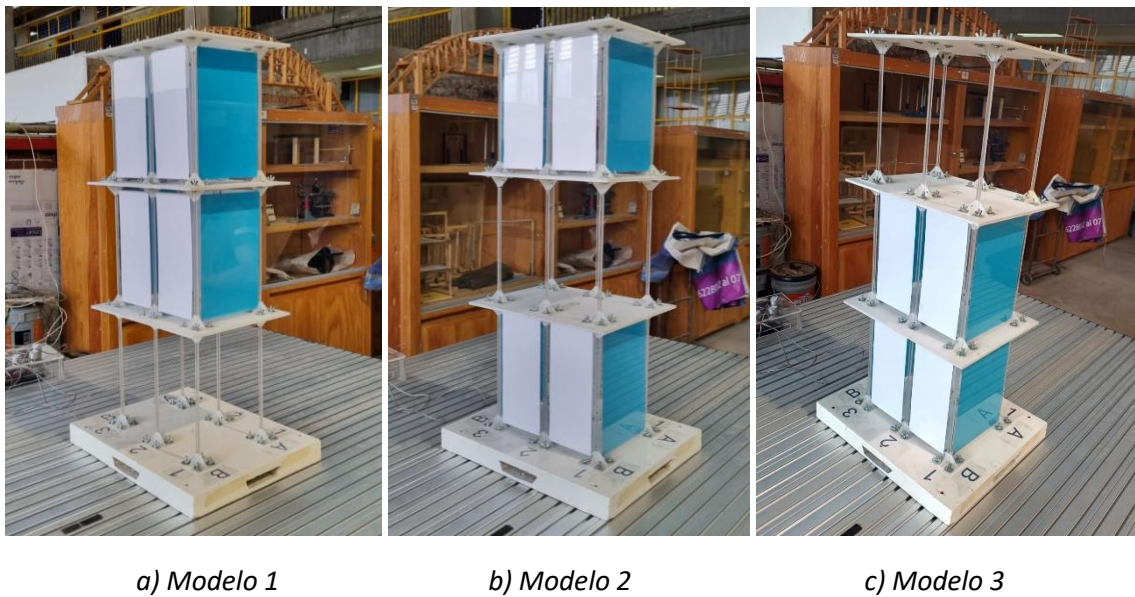
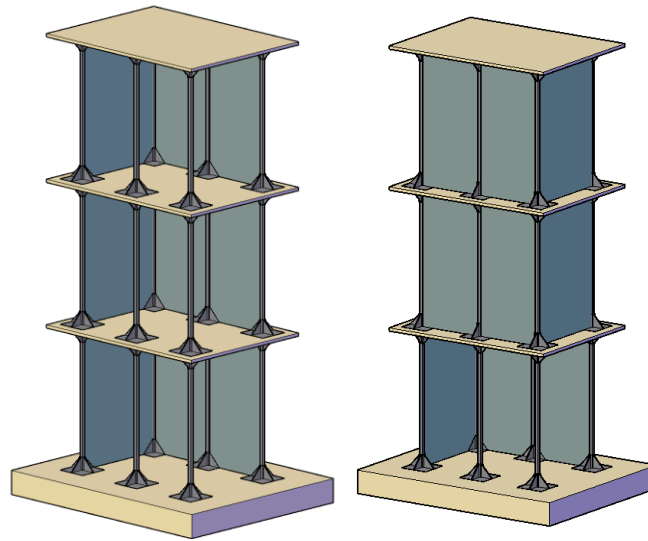


Figura 3.11. Modelos físicos con entrepiso flexible, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

3.4. Modelos 4 y 5 (edificios de esquina)

Con el fin de modelar el comportamiento de edificios de esquina, en los cuales es común que puedan presentarse cambios bruscos de rigidez en planos resistentes y en la altura, se construyeron dos modelos (No. 4 y No. 5). El modelo 4 consideró la existencia de muros en los ejes A y 3, de los 3 entrepisos, caracterizando a un edificio en esquina con distribución asimétrica en rigidez. En el modelo 5, se indujo una asimetría en elevación, eliminando muros en el primer entrepiso, en los ejes 1 y B, fig. 3.12 a 3.14, simulando un edificio en esquina con distribución asimétrica en rigidez y planta baja débil.



a) Modelo 4

b) Modelo 5

Figura 3.12. Modelos de edificios de esquina.

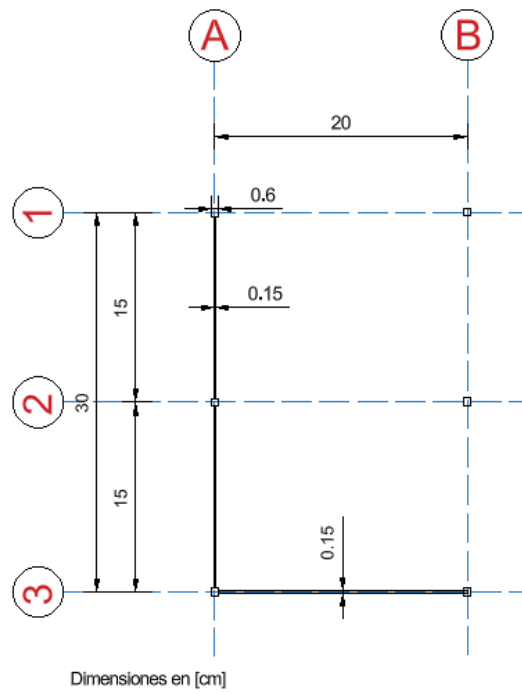


Figura 3.13. Entrepisos con muros asimétricos (en esquina).



a) Modelo 4



b) Modelo 5

Figura 3.14. Modelos físicos con asimetría en planta y cambios bruscos de rigidez lateral, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Capítulo 4. Determinación experimental de las propiedades dinámicas de los modelos

4.1. Fundamentos de análisis de señales

La determinación de las propiedades dinámicas de los modelos físicos estuvo basada en análisis de Fourier. Este planteamiento permite transformar las señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, fig. 4.1 y ec 4.1.

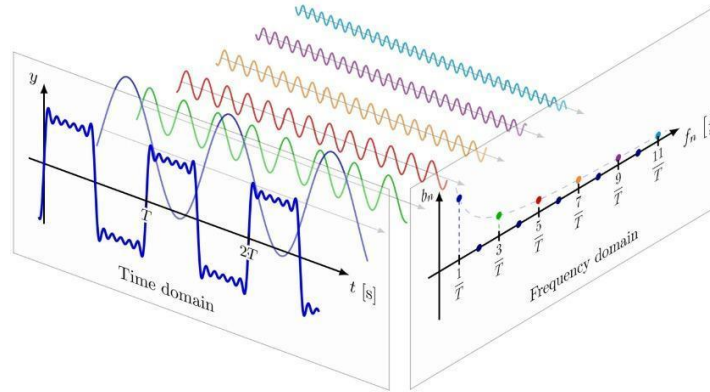


Figura 4.1. Proceso de descomposición espectral. Fuente: https://tikz.net/fourier_series/

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j 2\pi f t} dt \quad \text{con } j = \sqrt{-1} \quad (4.1)$$

donde $x(t)$ es una señal en el dominio del tiempo y $X(f)$ su transformada de Fourier.

Debido a que el registro de las señales en los equipos de adquisición de datos se realiza de forma discreta, se emplea la transformada discreta de Fourier, mediante la cual se pueden identificar las frecuencias que participan en la composición de la señal para el punto medido. Para identificar las frecuencias propias del modelo, es necesario hacer un análisis de correlación entre pares de señales empleando las funciones de coherencia, fase y transferencia, ecs. 4.2 a 4.5, Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (1993).

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (4.2)$$

Donde $H(f)$ es la función de transferencia, $X(f)$ y $Y(f)$ son los espectros de Fourier de las señales de entrada y salida, respectivamente.

$$\gamma_{xy}^2 = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_{XX}(f)G_{YY}(f)} \quad (4.3)$$

Donde γ_{xy}^2 es la función de coherencia, $G_{XY}(f)$, $G_{XX}(f)$ y $G_{YY}(f)$ son los espectros cruzado y de potencia de las señales de entrada y salida, $x(t)$ y $y(t)$, respectivamente.

$$G_{XY}(f) = A_{XY}(f) + j B_{XY}(f) \quad (4.4)$$

$$\theta_{XY} = \text{atan} \frac{B_{XY}(f)}{A_{XY}(f)} \quad (4.5)$$

Donde θ_{XY} es el ángulo de fase, obtenido en función de la parte real $A_{XY}(f)$ y la parte imaginaria $B_{XY}(f)$ de la función del espectro cruzado de potencia.

Para la obtención de los espectros de Fourier y el análisis de correlación entre señales antes expuesto, se usó un instrumento virtual desarrollado en el lenguaje de programación de objetos LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), fig. 4.2.

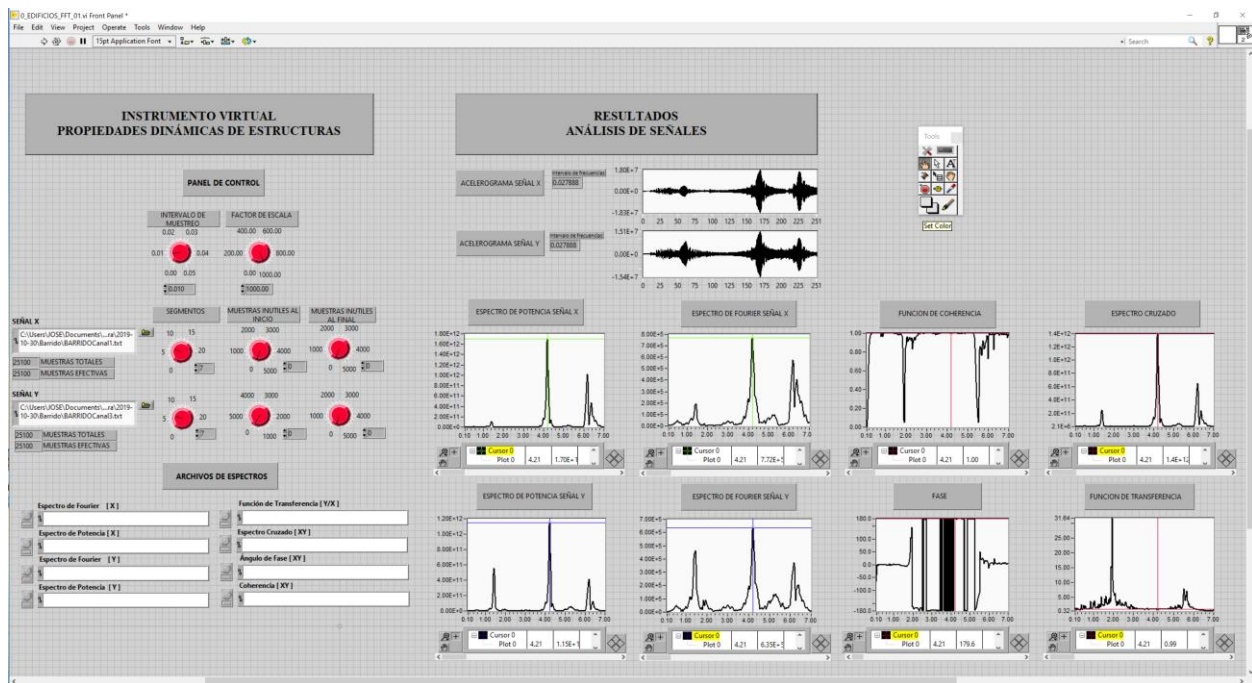


Figura 4.2. Panel de instrumento virtual para el análisis de las señales (Castelán, 2001).

4.2. Determinación de las propiedades dinámicas de los modelos

La mesa vibradora del Laboratorio de Materiales cuenta con un sistema de adquisición de datos que permite acoplar diversos tipos de sensores. En este caso, se emplearon acelerómetros unidireccionales tipo MEM modelo ADXL-203, fig. 4.3.



Figura 4.3. Acelerómetro tipo MEM modelo ADXL-203.

Para determinar las propiedades dinámicas de los modelos, se diseñaron distintos arreglos de sensores en los que se realizó un registro simultáneo de las señales producto de una acción dinámica generada en la base de la mesa vibradora, los cuales se describen a continuación.

4.2.1. Modelo 0

Protocolo experimental

Para el Modelo 0 se diseñaron 3 arreglos de sensores, fig. 4.4, en los primeros dos casos se colocaron los sensores en el centro de torsión del edificio, orientados en las direcciones transversal y longitudinal, permitiendo encontrar frecuencias asociadas a modos traslacionales; en el tercer arreglo, los sensores se colocaron excéntricos para determinar frecuencias asociadas a modos torsionales.

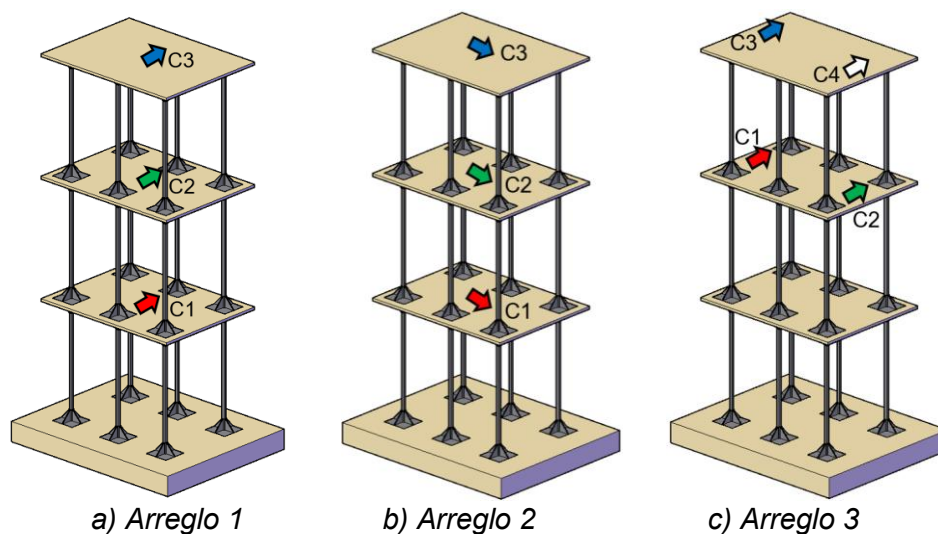


Figura 4.4. Arreglos de sensores para la determinación de propiedades dinámicas del Modelo 0.

Frecuencias de modos traslacionales en dirección transversal

Para determinar los periodos de vibrar en dirección transversal, se utilizó el arreglo 1 de sensores aplicando una vibración libre al modelo en esa dirección; se registraron las señales de manera simultánea y se realizó el análisis de correlación entre las señales de los sensores 2 y 3, fig. 4.5, así como entre las señales de los sensores 1 y 2, fig. 4.6. A continuación se describen los resultados encontrados:

- En el espectro cruzado se observan 3 frecuencias con una coherencia igual a 1.
- En el valor de la frecuencia 1.76 Hz, la función de fase entre las señales 2 y 3, así como 1 y 2 es muy cercana a cero, por lo que se concluye que el movimiento de los tres niveles está en fase y corresponde al primer modo de vibrar.
- En el valor de la frecuencia 5.17 Hz, la función de fase entre las señales 2 y 3 es casi de 180° , lo que indica que el movimiento de los niveles correspondientes es opuesto. Por otro lado, el análisis de las señales 1 y 2, arroja que la fase es muy cercana a cero, lo cual indica que el movimiento de los sensores se realiza con el mismo sentido; sin embargo, por la fase de 180° entre las señales 2 y 3, se deduce que la frecuencia está asociada a un segundo modo de vibrar.
- Para la frecuencia 7.61 Hz la función de fase entre las señales 1 y 2, así como las señales 2 y 3, es igual que 180° , por lo que se concluye que los niveles consecutivos se mueven en sentido opuesto y por tanto la frecuencia corresponde al tercer modo de vibrar en traslación.

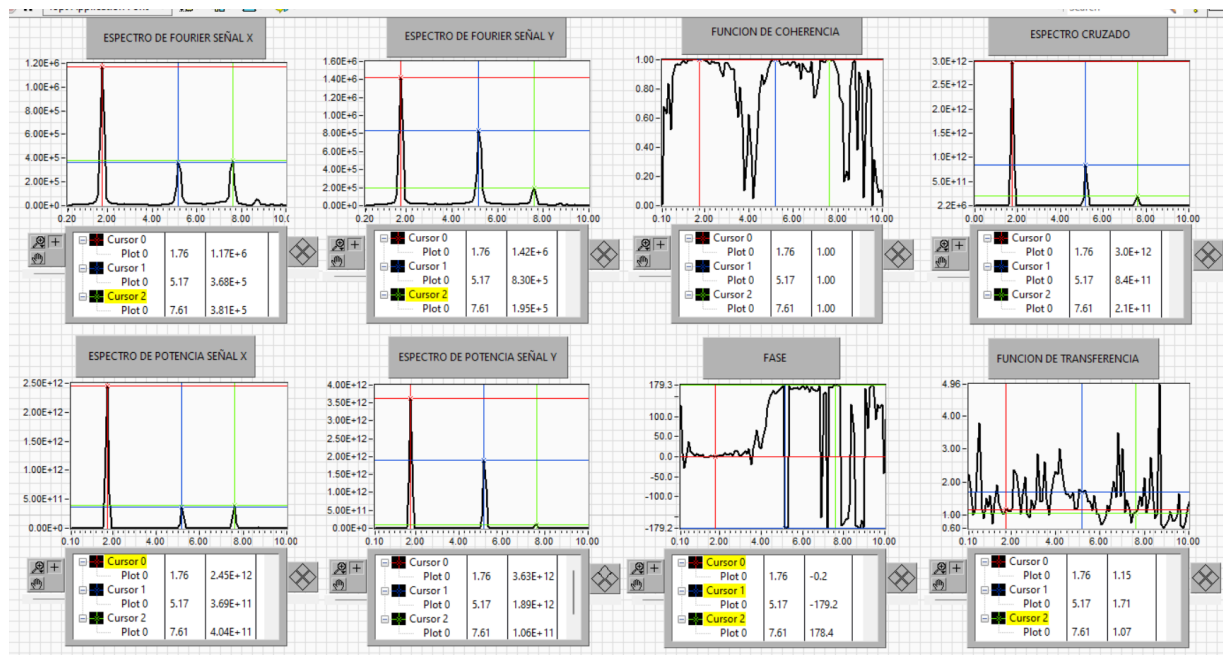


Figura 4.5. Análisis de correlación entre las señales registradas en los niveles 2 y 3 del Modelo 0 y en dirección transversal (Arreglo 1), (García, O y Pontón, J. A. 2024).

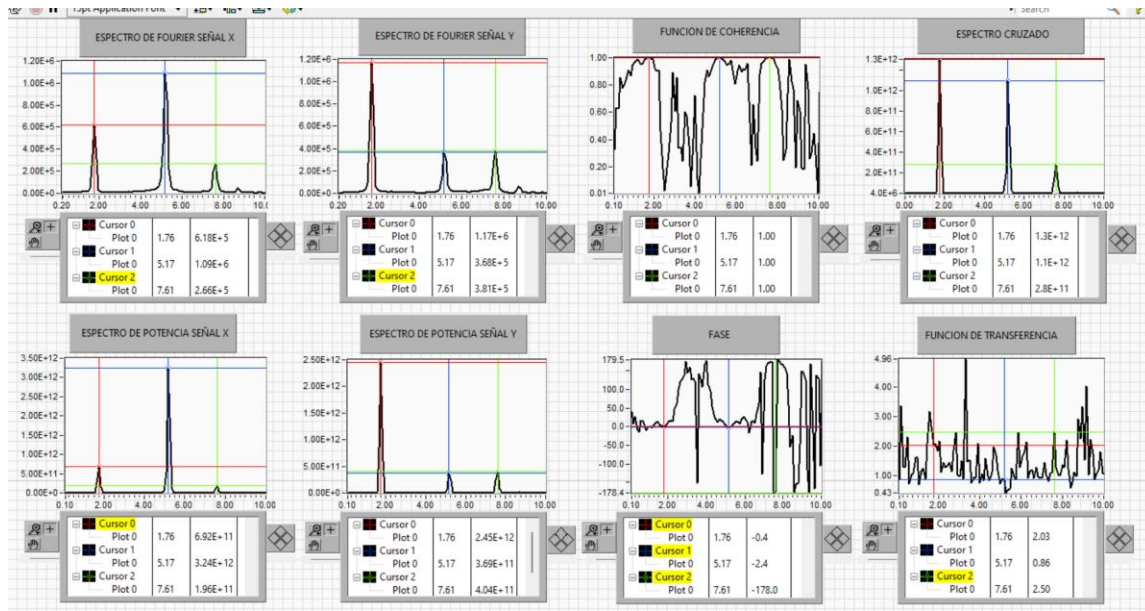


Figura 4.6. Análisis de correlación entre las señales registradas en los niveles 1 y 2 del Modelo 0 y en dirección transversal (Arreglo 1), (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Frecuencias de modos traslacionales en dirección longitudinal

Con el arreglo 2 de sensores, mediante un procedimiento análogo, se realizó la determinación de las frecuencias en sentido longitudinal, figs. 4.7 y 4.8. Como se observa se obtuvieron prácticamente los mismos resultados de frecuencias, mismos que se describen a continuación:

- En el espectro cruzado se observan 3 frecuencias con una coherencia igual a 1.
- El valor de la frecuencia 1.76 Hz corresponde al primer modo de vibrar.
- El valor de la frecuencia 5.27 Hz, está asociada al segundo modo de vibrar.
- El valor de la frecuencia 7.61 Hz corresponde al tercer modo de vibrar.

La similitud de los valores de frecuencias traslacionales en los arreglos 1 y 2, se debe a que la rigidez lateral del modelo está determinada por la contribución de las columnas, es decir, $\Sigma 12EI/L^3$, ya que el modelo no posee vigas, funcionando como un modelo de cortante.

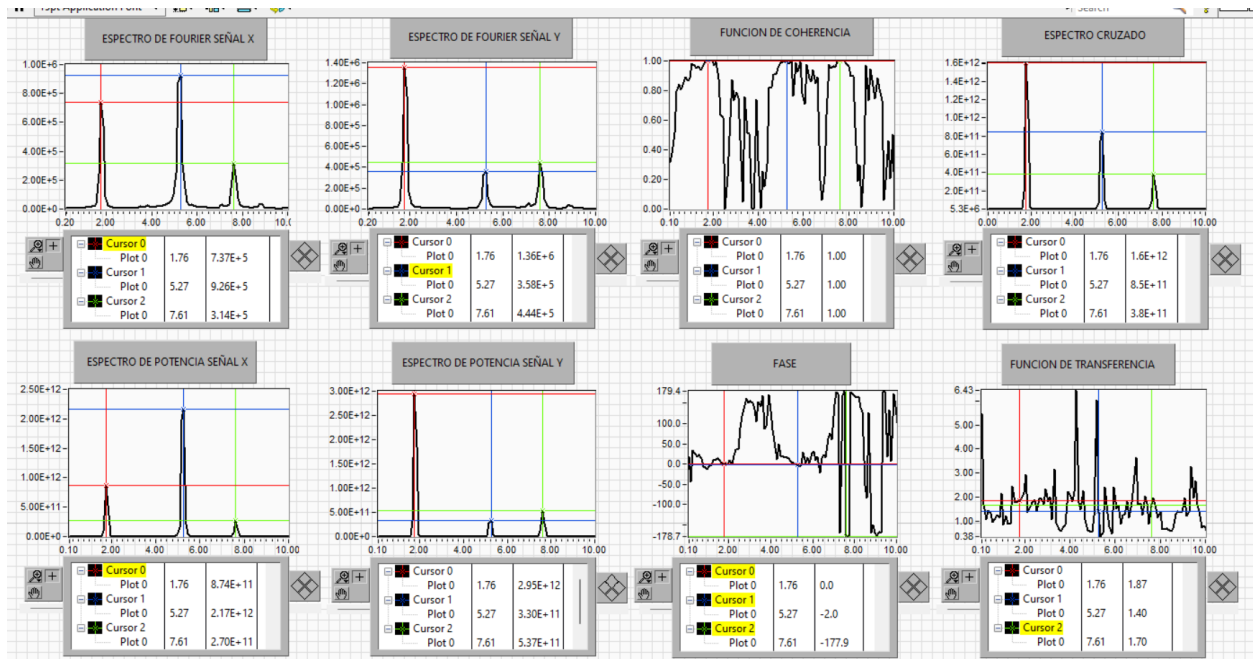


Figura 4.7. Análisis de correlación entre las señales registradas en los niveles 1 y 2 del Modelo 0 y en dirección longitudinal (Arreglo 2), (García, O y Pontón, J. A. 2024).

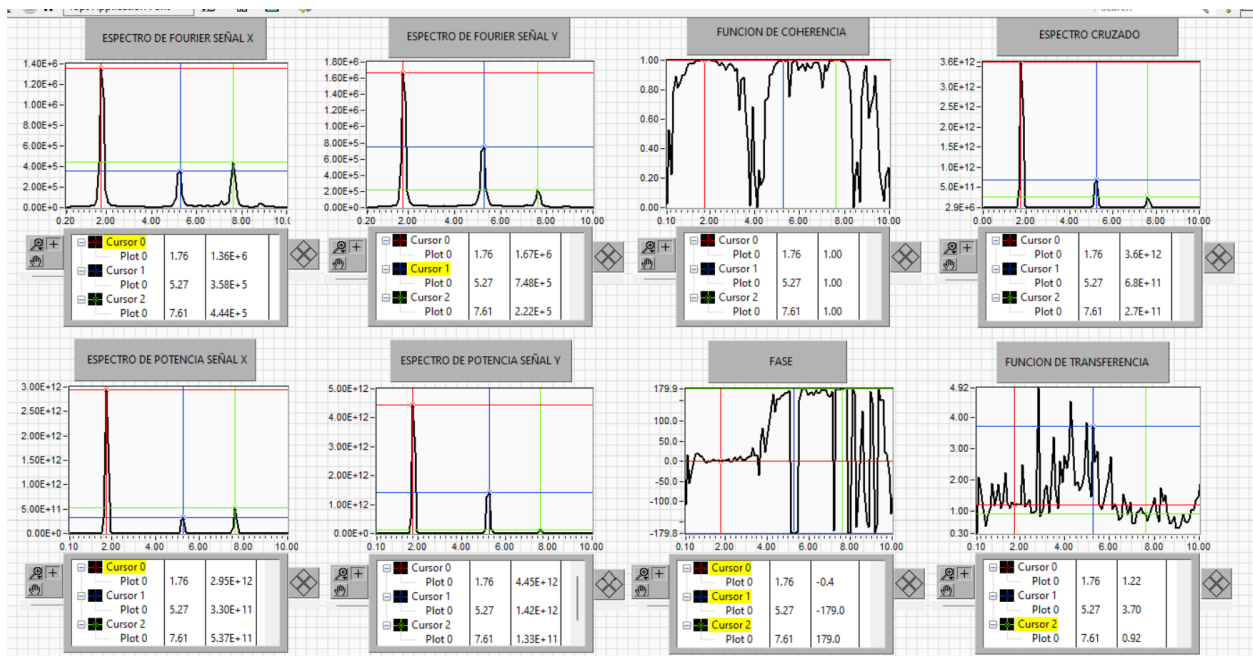


Figura 4.8. Análisis de correlación entre las señales registradas en los niveles 2 y 3 del Modelo 0 y en dirección longitudinal (Arreglo 2), (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Frecuencias de modos torsionales

Para determinar las frecuencias asociadas a la torsión de la estructura se empleó el arreglo 3, en el cual se aprecia la colocación excéntrica de sensores en un mismo nivel. Para excitar las frecuencias torsionales se aplicó una rotación torsional al modelo en la losa del 3er nivel y se dejó vibrar libremente. A continuación, se presenta el análisis de correlación entre las señales de los sensores 3 y 4, fig. 4.9.

- En el espectro cruzado se observan 3 frecuencias (2.08, 6.04 y 8.51Hz) con coherencia igual a 1
- Debido a que, para las tres frecuencias entre los sensores 3 y 4, se presentan funciones de fase de 180° , se concluye que estas corresponden a los tres primeros modos torsionales de la estructura.

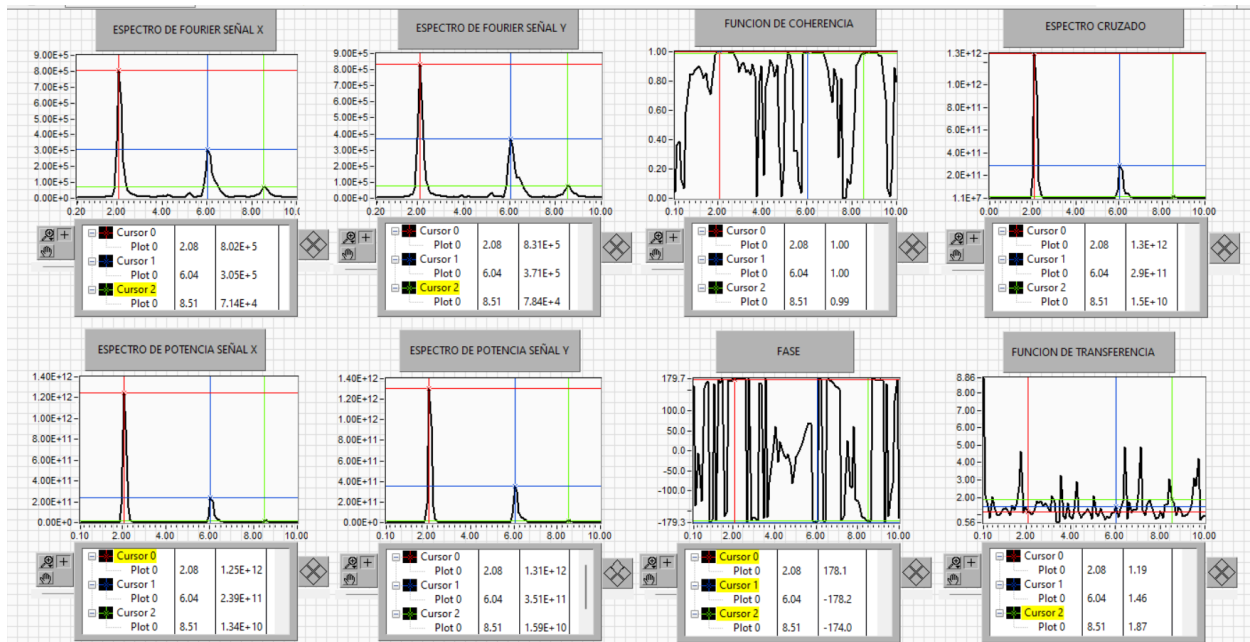


Figura 4.9. Análisis de correlación entre las señales 3 y 4, ambas registradas en los extremos de la azotea del Modelo 0 y en torsión, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Resumen de frecuencias de vibrar del modelo 0

En la tabla 4.1 se resumen las frecuencias y los periodos para cada una de las formas modales de la estructura, así como su dirección, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Tabla 4.1. Periodos y frecuencias del Modelo 0.

Modo	Frecuencia	Periodo	Dirección
	Hz	s	
1	1.76	0.568	Transversal
2	1.76	0.568	Longitudinal
3	2.08	0.481	Torsión
4	5.17	0.193	Transversal
5	5.27	0.190	Longitudinal
6	6.04	0.166	Torsión
7	7.61	0.131	Transversal
8	7.61	0.131	Longitudinal
9	8.51	0.118	Torsión

Determinación de la fracción de amortiguamiento crítico

La estimación del porcentaje de amortiguamiento crítico ξ del edificio se realizó a partir del método del decremento logarítmico dado por la ec. 4.6, para lo cual se requiere conocer su respuesta en vibración libre. Se graficó la respuesta en términos de aceleración y se obtuvieron los puntos máximos, los cuales se ajustaron a una función exponencial, fig. 4.10. Conocida la frecuencia de vibrar del primer modo y suponiendo un comportamiento predominantemente en ese modo, se obtuvo una fracción de amortiguamiento respecto al crítico del 2%.

$$y = e^{-\xi\omega t} \quad (4.6)$$

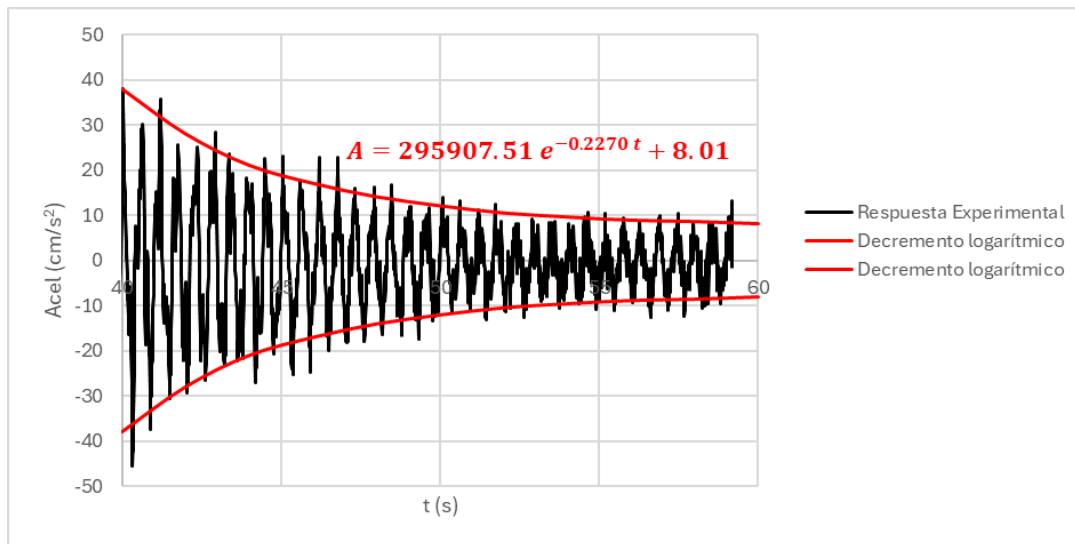


Figura 4.10. Decremento logarítmico de la respuesta del modelo 0, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

4.2.2. Modelos 1, 2, 3, 4 y 5

Protocolo experimental

Para determinar las frecuencias de vibrar de los modelos 1, 2, 3, 4 y 5 se empleó un arreglo de sensores colocados ortogonal y excéntricamente en el nivel de azotea. Para fines ilustrativos, en las figs. 4.11 a 4.12, se presenta la instrumentación del modelo 2.

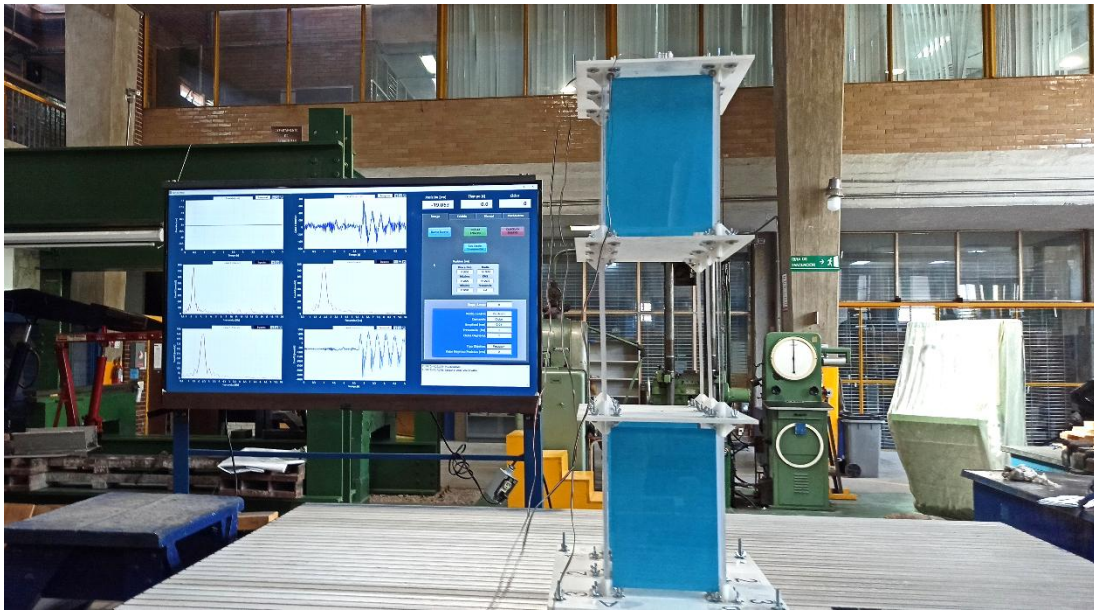


Figura 4.11. Instrumentación del modelo 2 para obtención frecuencias de vibrar a partir espectros de Fourier, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

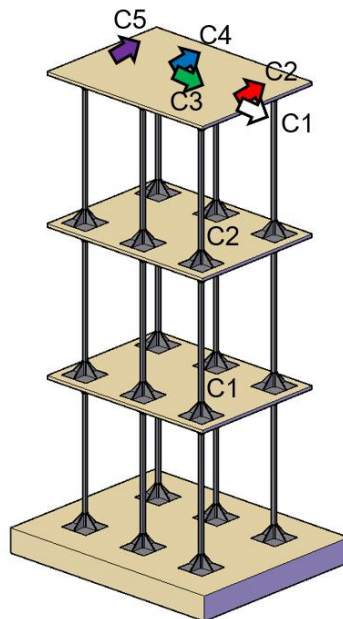


Figura 4.12. Arreglo de sensores para la determinación de propiedades dinámicas de los Modelos 1, 2, 3, 4 y 5.

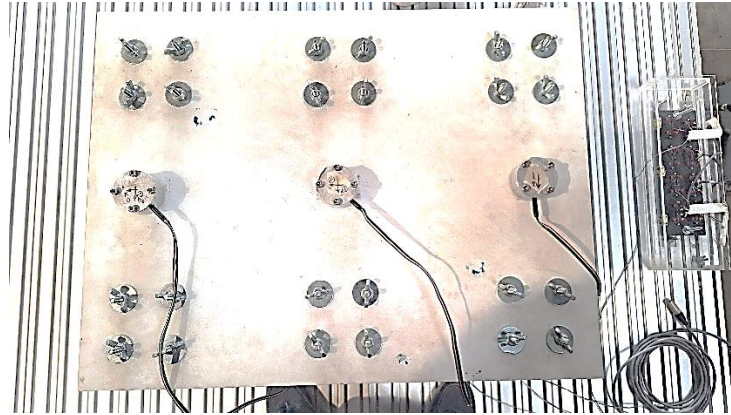


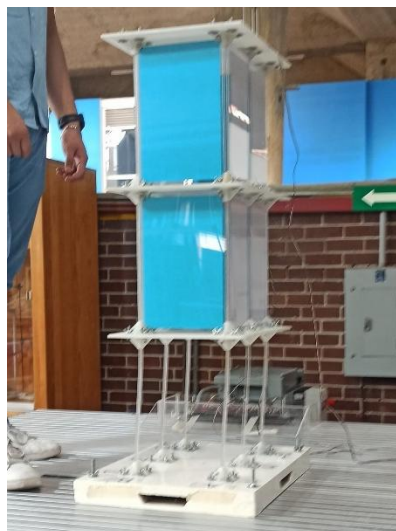
Figura 4.13. Colocación de sensores para la determinación de propiedades dinámicas de los Modelos 1, 2, 3, 4 y 5, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Frecuencias naturales de vibrar

Una vez que fueron instrumentados los modelos y dada la flexibilidad que poseen, fue factible determinar las frecuencias de vibrar asociadas a los modos dominantes mediante vibración libre inducida a partir de una condición deformada lateral y/o torsional, según el modo de interés. La respuesta de los modelos fue registrada y procesada por el sistema de adquisición de la mesa vibradora para obtener los espectros de Fourier e identificar las frecuencias naturales de vibrar asociadas a las direcciones de estudio. En las figs. 4.14 a 4.23 se muestra el procedimiento descrito y los resultados obtenidos para los modelos 0,1,2,3,4 y 5. Así mismo en el anexo 1, se presentan las ligas para acceder al material videográfico donde se visualizan las respuestas de estos modelos.



a) *Traslación transversal*



b) *Traslación longitudinal*



c) *Torsión*

Figura 4.14. Inducción de vibración libre en el Modelo 1, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

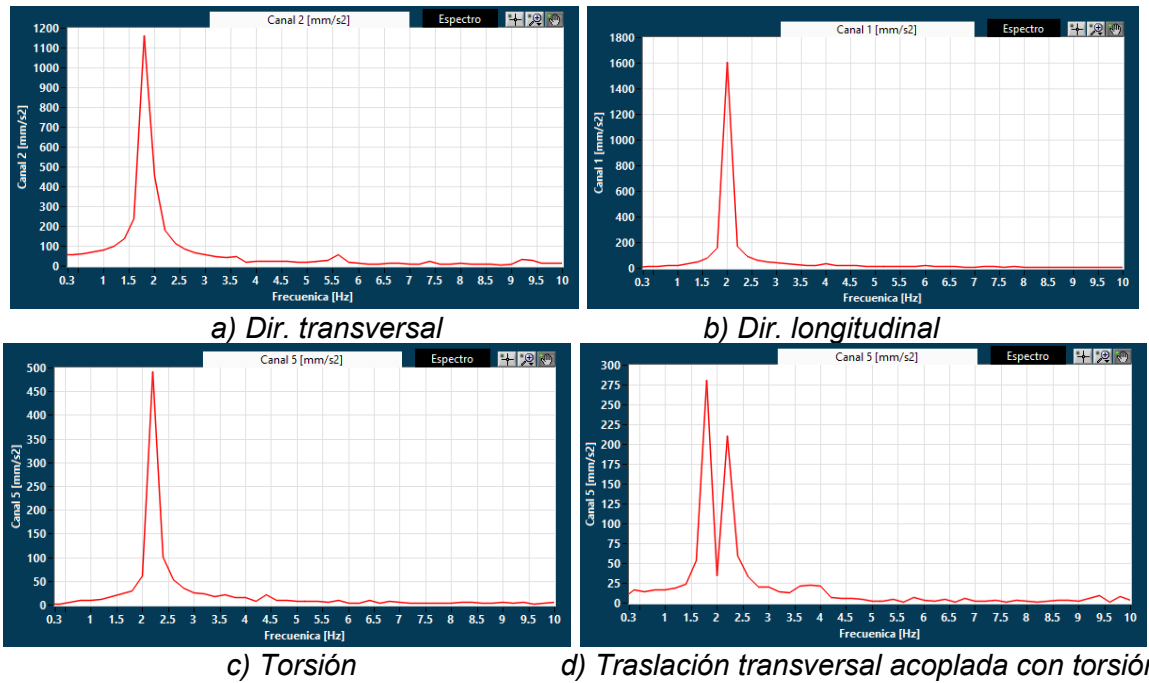


Figura 4.15. Espectros de Fourier de las señales registradas en la azotea del Modelo 1, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

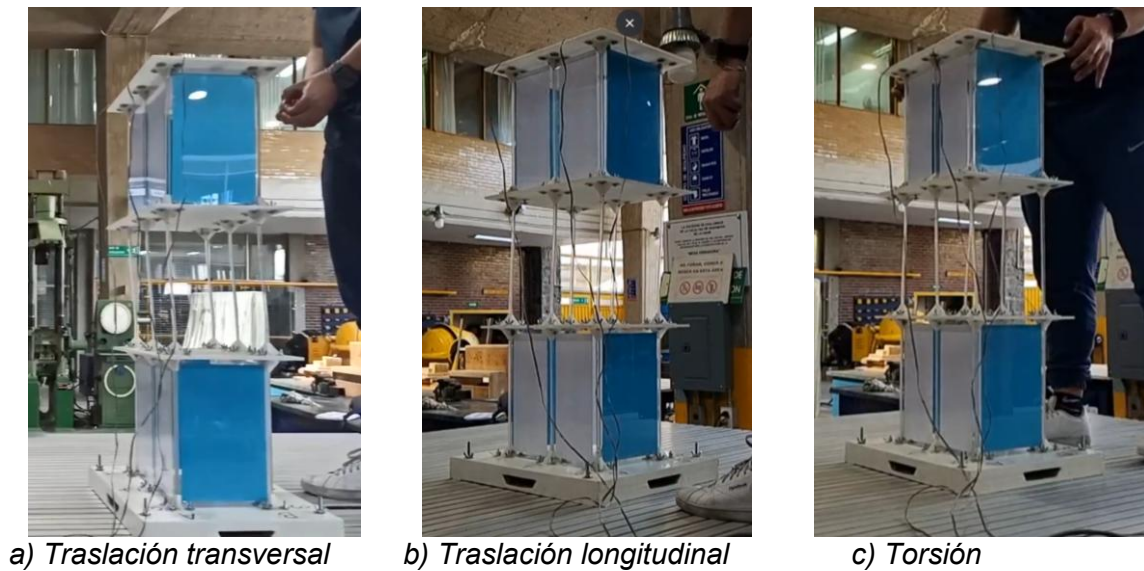


Figura 4.16. Inducción de vibración libre en el Modelo 2, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

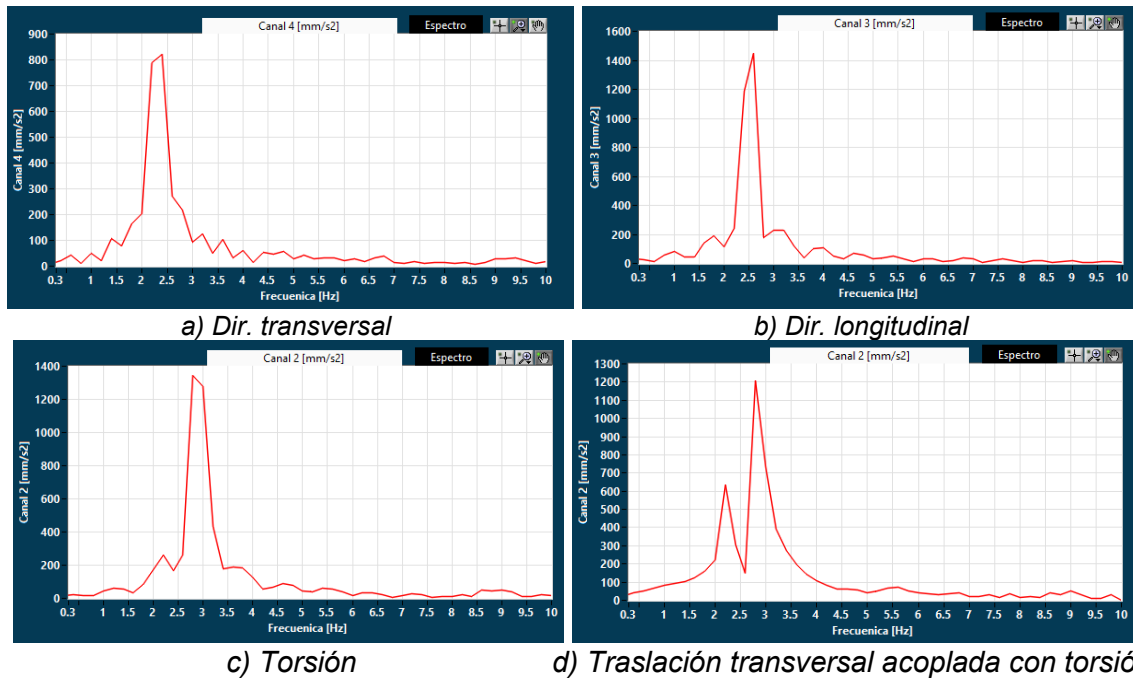


Figura 4.17. Espectros de Fourier de las señales registradas en la azotea del Modelo 2, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

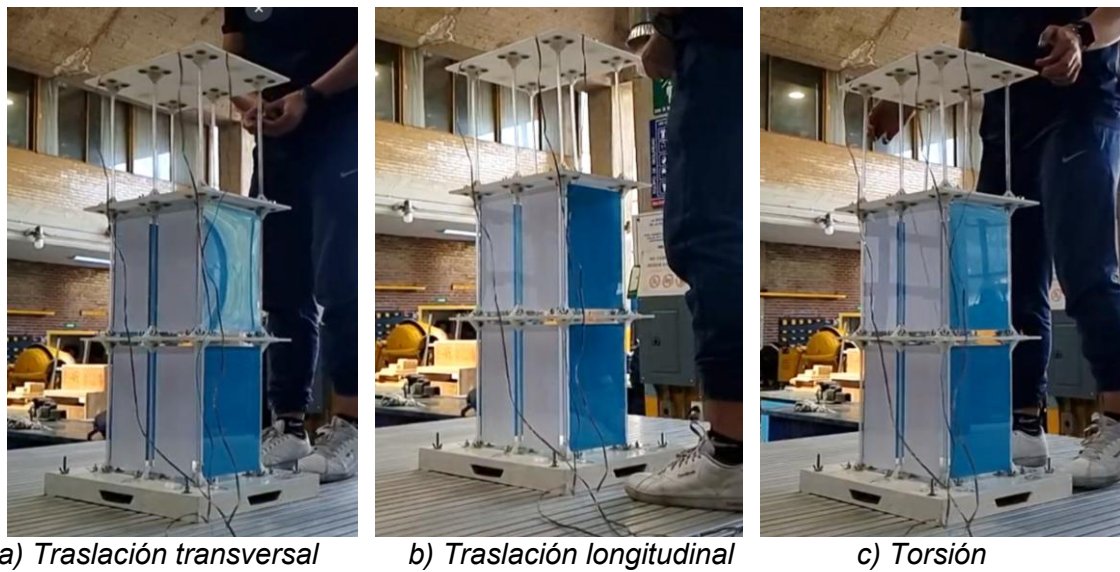


Figura 4.18. Inducción de vibración libre en el Modelo 3, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

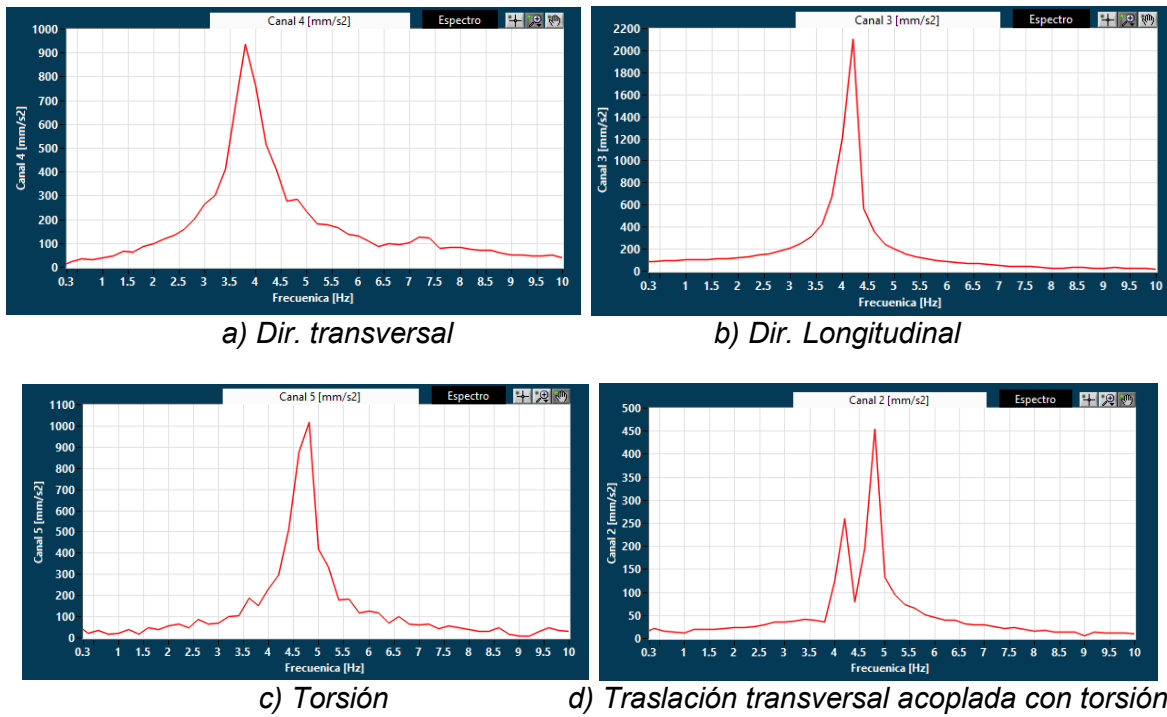


Figura 4.19. Espectros de Fourier de las señales registradas en la azotea del Modelo 3, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

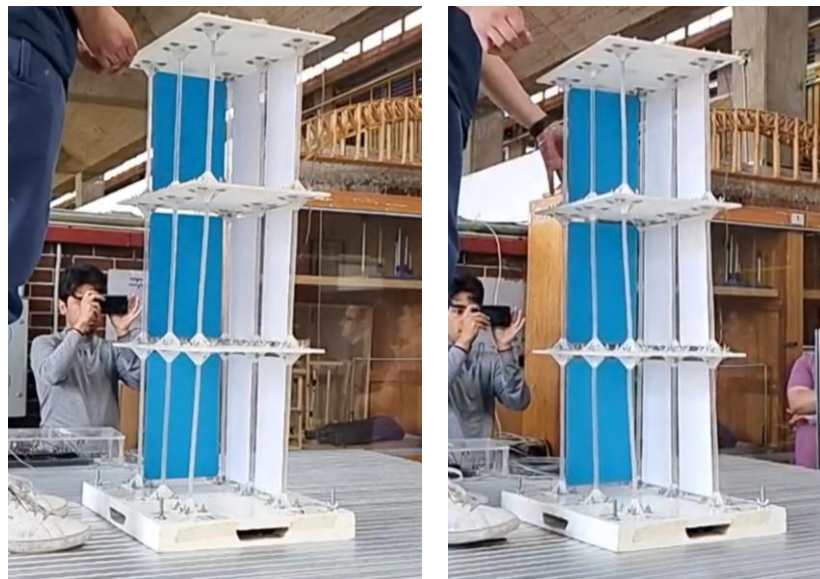


Figura 4.20. Vibración del modelo 4, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

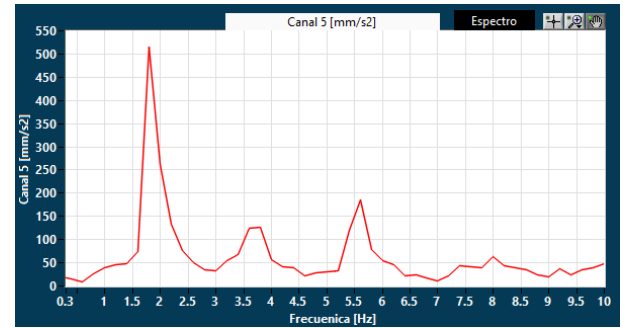
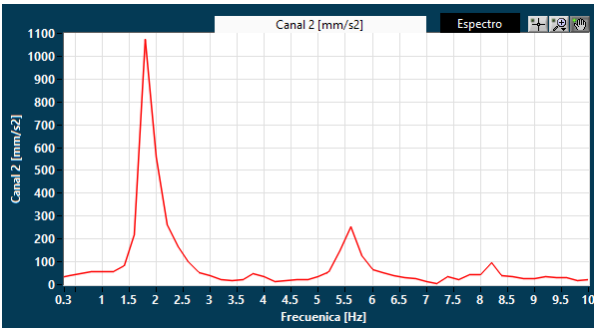


Figura 4.21. Espectros de Fourier de las señales registradas en la azotea del Modelo 4, (García, O y Pontón, J. A. 2024).



Figura 4.22. Vibración del modelo 5, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

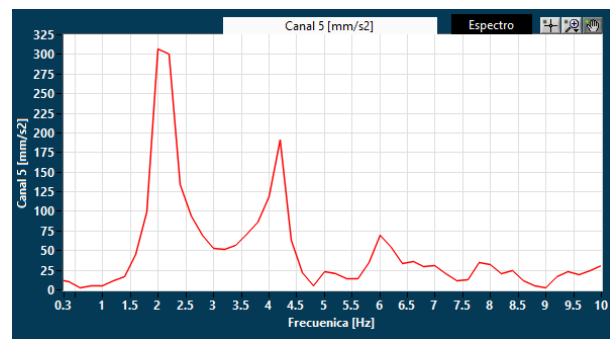
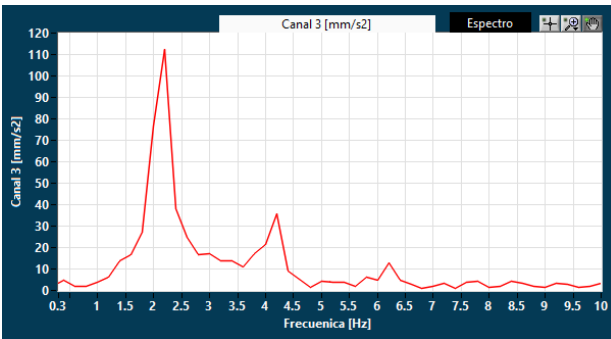


Figura 4.23. Espectros de Fourier de las señales registradas en la azotea del Modelo 5, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Frecuencias naturales de vibrar

En las tablas 4.2 y 4.3 se presentan el resumen de las frecuencias y periodos de los modos dominantes de vibrar de los seis modelos físicos. Nótese que en los modelos 4 y 5 solo se indicó el modo fundamental, cuya dominancia de movimiento es en torsión, no se pudieron identificar claramente otros modos superiores de vibrar, debido a la complejidad del comportamiento torsional-lateral acoplado.

Tabla 4.2. Frecuencias dominantes de vibrar de los modelos físicos, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Modelo	frecuencia (Hz)		
	Transversal	Longitudinal	Torsión
0	1.76	1.76	2.08
1	1.8	2	2.2
2	2.3	2.6	2.9
3	3.9	4.2	4.8
4	-	-	1.8
5	-	-	2.1

Tabla 4.3. Periodos dominantes de vibrar de los modelos físicos, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Modelo	T (s)		
	Transversal	Longitudinal	Torsión
0	0.568	0.568	0.481
1	0.556	0.500	0.455
2	0.435	0.385	0.345
3	0.256	0.238	0.208
4			0.556
5			0.476

Capítulo 5. Obtención de respuestas experimentales y numéricas

5.1. Acciones dinámicas aplicadas a los modelos físicos

Para estudiar la respuesta analítica y experimental de los modelos, se seleccionó como acción sísmica la componente norte-sur del sismo registrado el 18 de mayo de 1940 a las 21:35h (tiempo del Pacífico) en Imperial Valley, Estados Unidos, comúnmente conocido como el sismo de “El Centro”, fig. 5.1. Esto debido a que su intensidad y contenido de frecuencias ocasionaron a los modelos estructurales propuestos, demandas mayores a las producidas por registros del S19-2017. Cabe destacar que fue necesario escalar la demanda sísmica al 50% para evitar que los modelos sufrieran daño. Dado que el movimiento de la mesa vibradora está controlado por desplazamientos, se requirió obtener el registro de desplazamientos correspondiente, figs. 5.2 y 5.3.

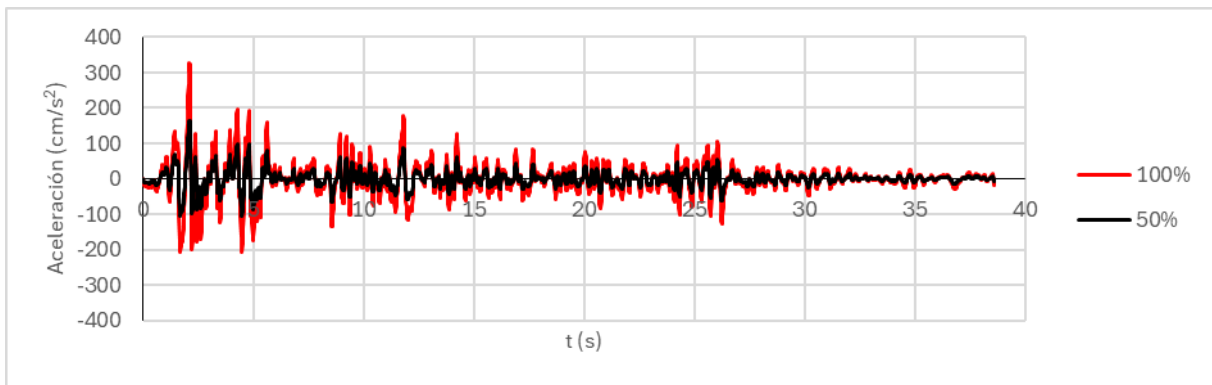


Figura 5.1. Acelerograma del sismo “El Centro” en escala real (100%) y escalado al 50%, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

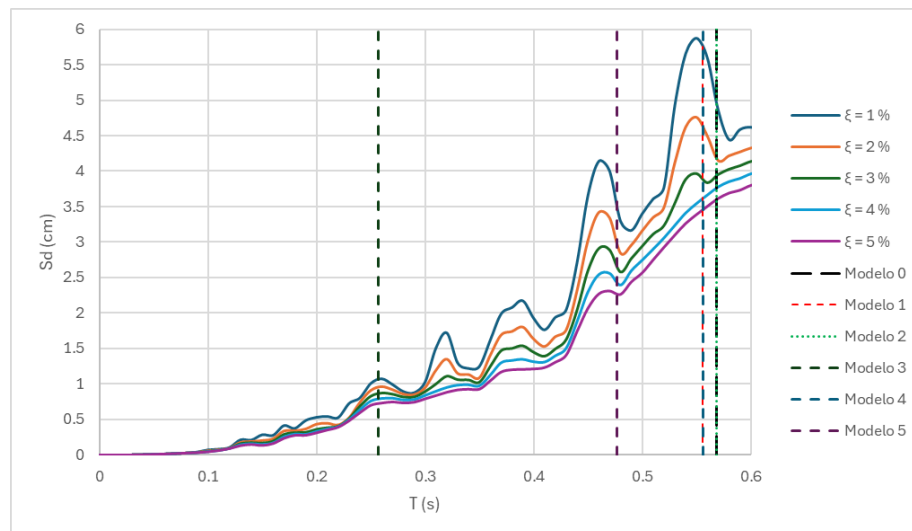


Figura 5.2. Espectros de respuesta en términos de desplazamiento para el sismo “El Centro” escalado al 50%, calculados para diferentes valores de razones de amortiguamiento respecto al crítico, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

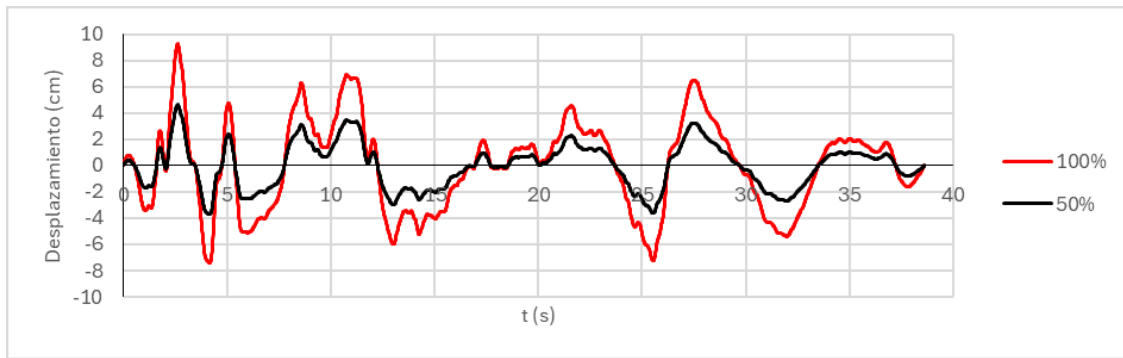


Figura 5.3. Desplazogramas del sismo “El Centro” en escala real (100%) y escalado al 50%, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

5.2. Coherencia entre las señales de entrada y salida de la mesa vibradora

Al comparar las señales de entrada (archivo introducido al programa que controla la mesa vibradora) y de salida (desplazamiento real de la mesa vibradora medido con un sensor de desplazamiento LVDT) se puede observar buena correspondencia, figs. 5.4 a 5.7, lo cual es fundamental para evaluar la respuesta analítica de los modelos.

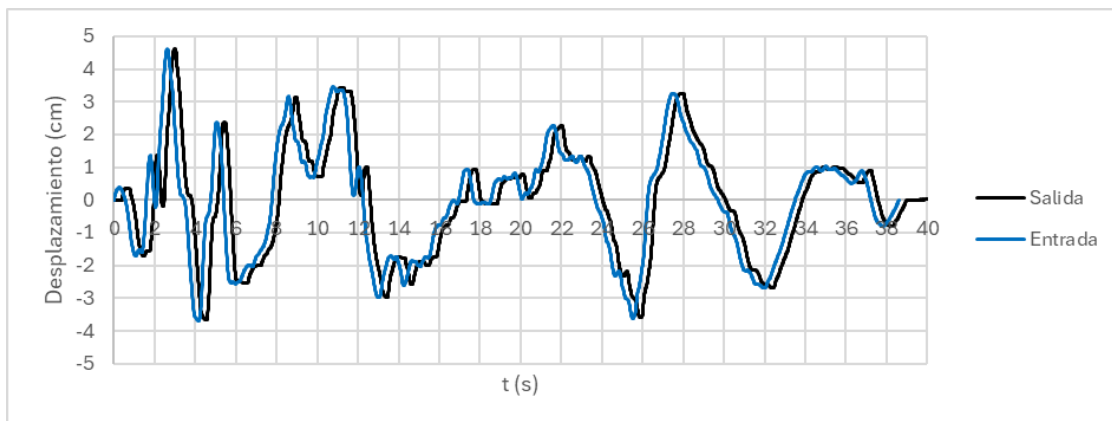


Figura 5.4. Comparación de los desplazogramas de entrada y salida de la mesa vibradora, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

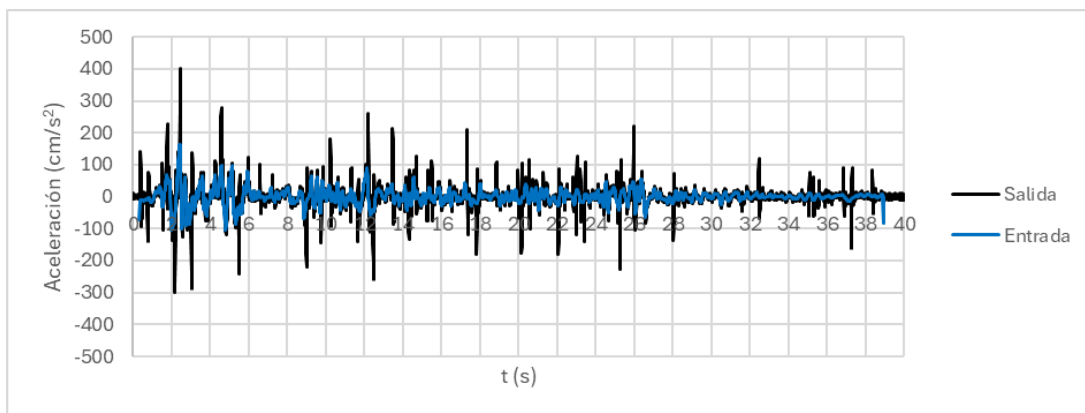


Figura 5.5. Comparación de los acelerogramas de entrada y salida de la mesa vibradora, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

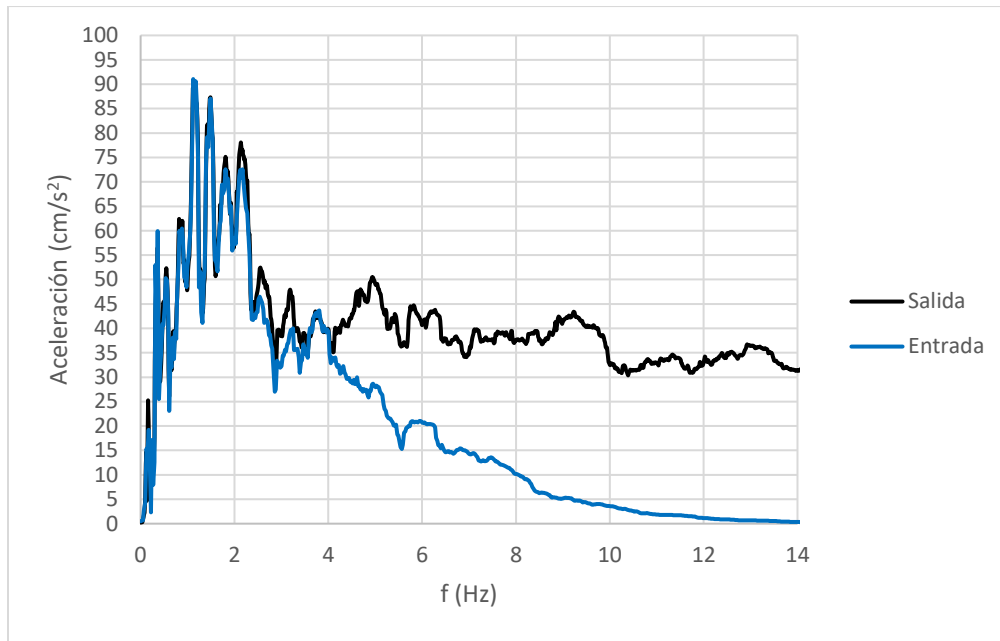


Figura 5.6. Comparación de los espectros de Fourier de los acelerogramas de entrada y salida de la mesa vibradora, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

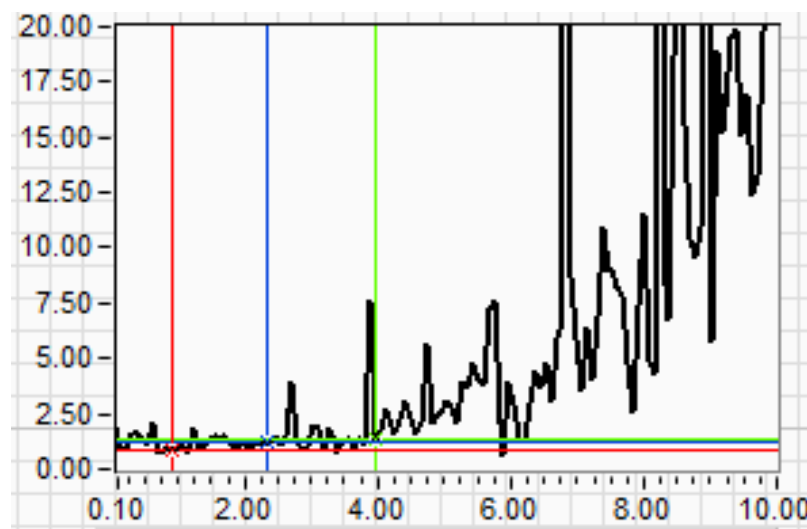
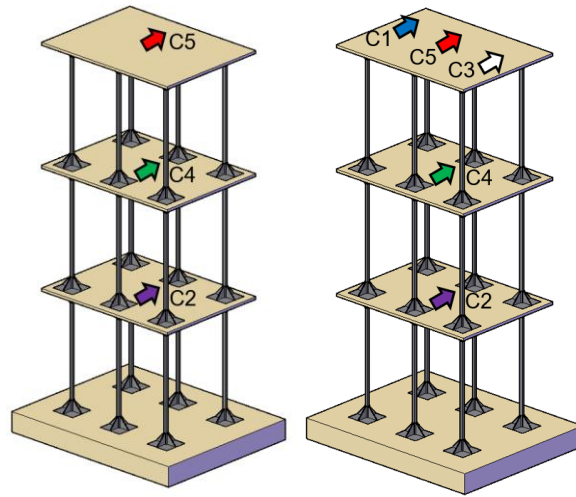


Figura 5.7. Función de transferencia entre los acelerogramas de entrada y salida de la mesa vibradora, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

5.3. Instrumentación

Para estudiar la respuesta dinámica de los modelos ante la excitación sísmica seleccionada, se indujo el desplazamiento en la dirección transversal, empleándose los dos arreglos de sensores mostrados en la fig. 5.8. El primero de los arreglos fue empleado en los modelos 0, 1, 2 y 3, debido a que son simétricos en planta, mientras que el arreglo 2 se utilizó en los modelos 4 y 5 con el fin de evaluar el acoplamiento lateral torsional generado por su asimetría en rigideces.



a) Arreglo 1

b) Arreglo 2

Figura 5.8. Arreglos de sensores empleados para medir la respuesta de los modelos ante la acción sísmica inducida.

5.4. Respuesta experimental de los modelos

En las figs. 5.9 a 5.14, se presentan las respuestas experimentales de los modelos en función de la aceleración registrada en su azotea, producto de la acción sísmica aplicada. Para los modelos 4 y 5, se consideró de interés presentar por separado la respuesta de los planos resistentes rígido y flexible, que ilustran los efectos tan desfavorables generados por el acoplamiento lateral torsional en estructuras que poseen distribuciones asimétricas en rigideces en su planta.

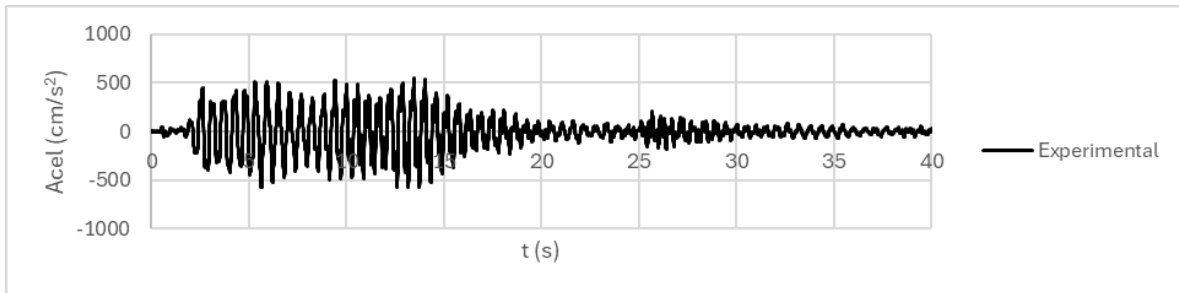


Figura 5.9. Aceleración en la azotea del modelo 0, medida experimentalmente, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

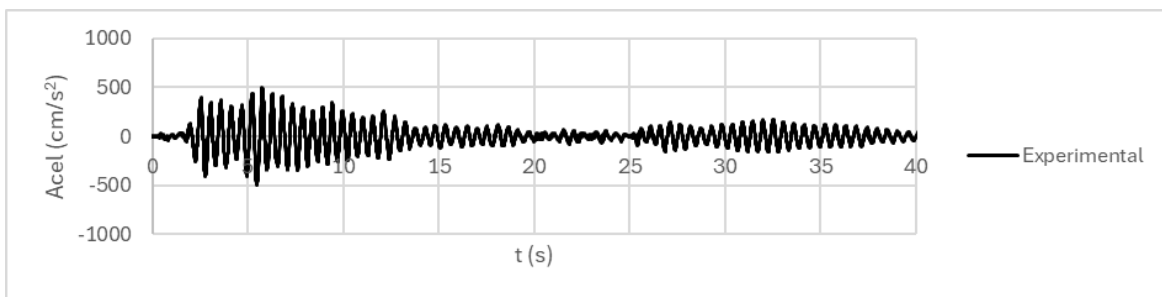


Figura 5.10. Aceleración en la azotea del modelo 1, medida experimentalmente, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

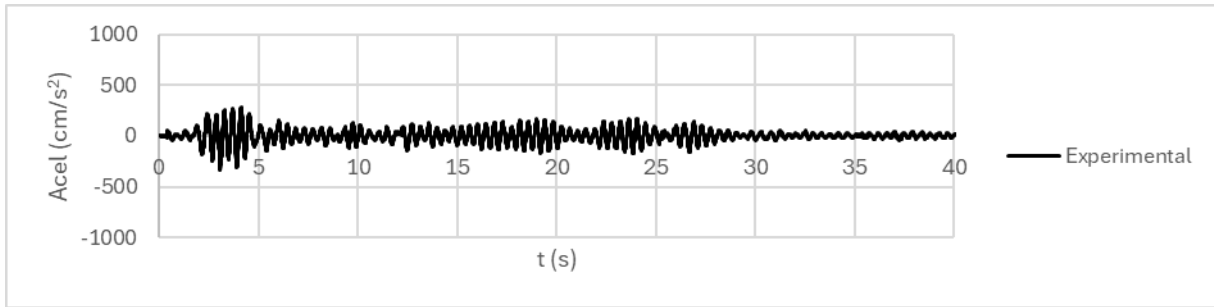


Figura 5.11. Aceleración en la azotea del modelo 2, medida experimentalmente, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

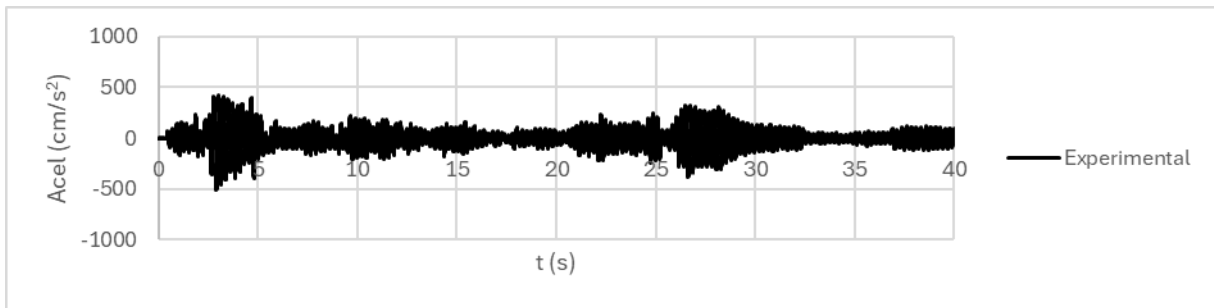
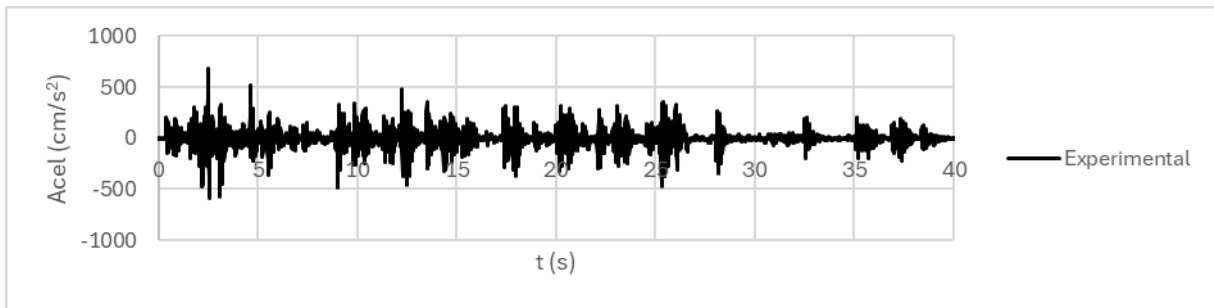
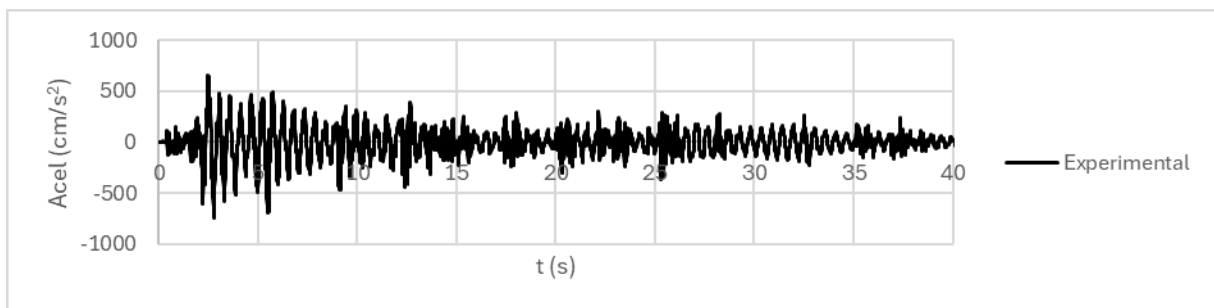


Figura 5.12. Aceleración en la azotea del modelo 3, medida experimentalmente, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

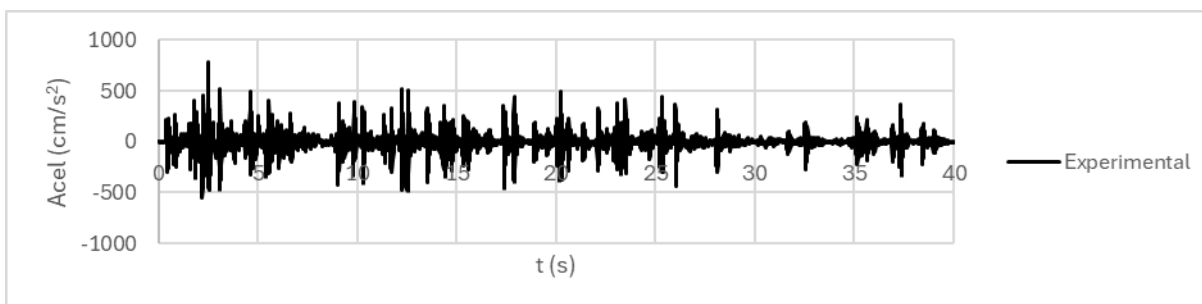


a) Lado rígido

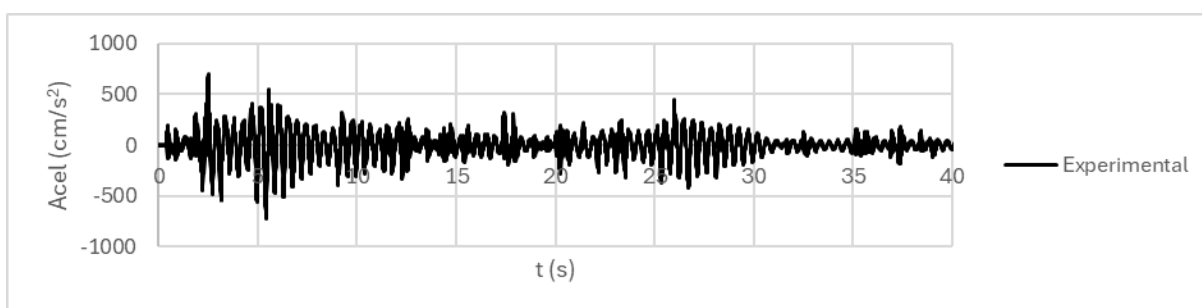


b) Lado flexible

Figura 5.13. Aceleración en la azotea del modelo 4, medida experimentalmente, (García, O y Pontón, J. A. 2024).



a) Lado rígido



b) Lado flexible

Figura 5.14. Aceleración en la azotea del modelo 5, medida experimentalmente, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

En el anexo 2 se presentan las ligas para acceder al material videográfico donde se visualizan las respuestas de estos modelos.

5.5. Desarrollo de modelos numéricos

Para obtener la respuesta numérica de los modelos de edificios se realizó la modelación empleando un software comercial a partir de las características geométricas de los sistemas estructurales especificadas en el capítulo 4, de las propiedades de los materiales y masas correspondientes, tabla 5.1.

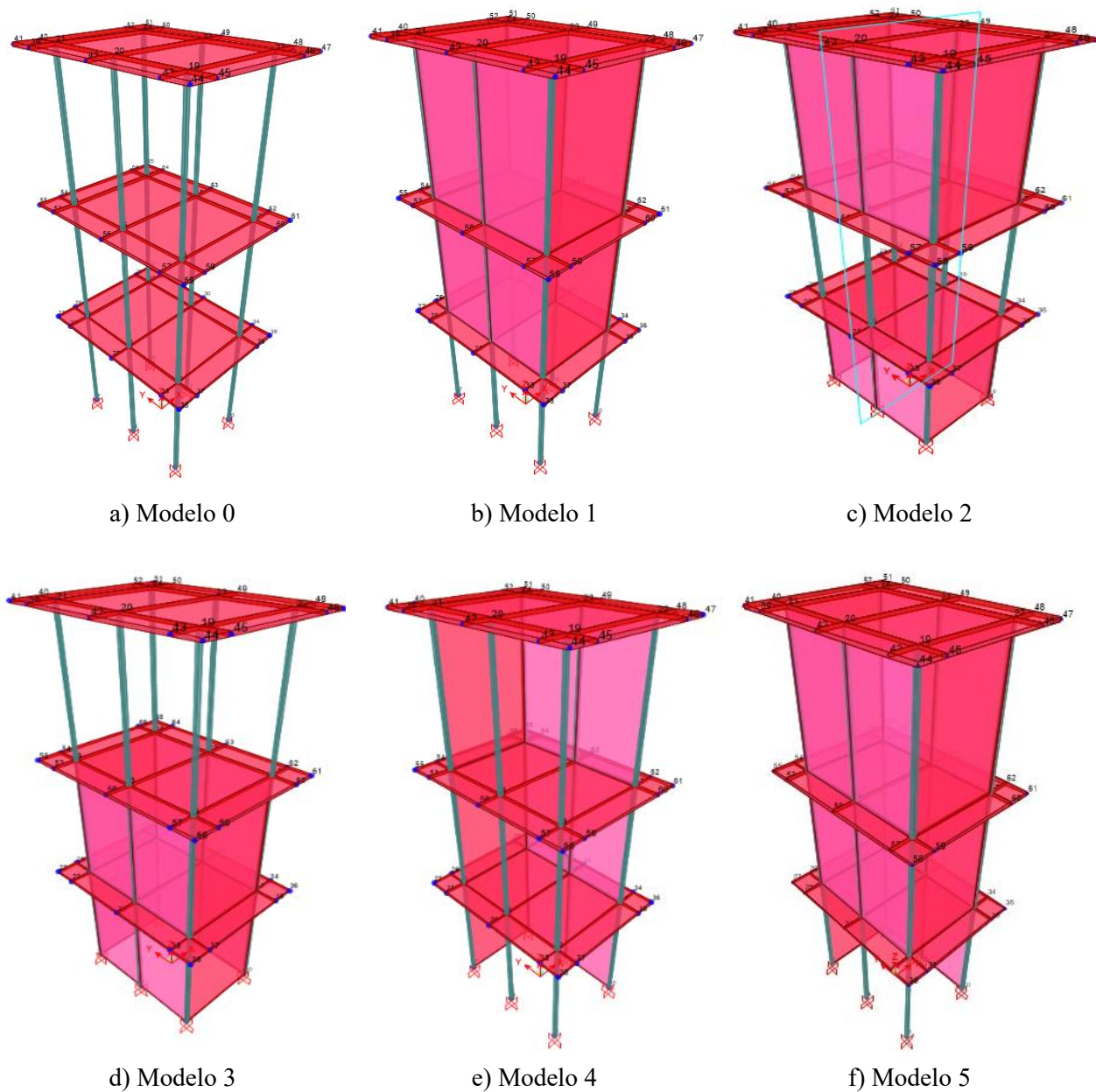


Figura 5.15. Modelación numérica de las 6 configuraciones de edificios, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Tabla 5.1. peso propio de cada nivel del modelo, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Nivel	Peso propio (kgf)			PP total	
	Losa	Columnas	Conexiones	kgf	kgf/cm2
3	0.857	0.039	0.339	1.235	0.0010289
2	0.857	0.078	0.402	1.337	0.0011138
1	0.857	0.078	0.402	1.337	0.0011138

5.6. Frecuencias y modos de vibrar

Para cada modelo se obtuvieron sus propiedades dinámicas dadas por sus frecuencias y sus modos naturales de vibrar, los cuales se compararon con los resultados experimentales con el fin de lograr que la modelación numérica realizada representara adecuadamente las características y el comportamiento de los modelos físicos o prototipos. En las tablas 5.2 a 5.4 se muestra la comparación de las frecuencias analíticas y experimentales, donde se aprecia que las diferencias son relativamente pequeñas, menores al 10%, por lo que se concluye que los modelos analíticos reproducen razonablemente bien el comportamiento dinámico de los modelos físicos.

Tabla 5.2. Comparación de los periodos de vibrar del Modelo 0, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

T (s)		Diferencia
Experimental	Numérico	
0.568	0.568	0.0%
0.568	0.568	0.1%
0.481	0.481	-0.1%
0.193	0.202	-4.5%
0.190	0.202	-6.3%
0.166	0.172	-3.7%
0.131	0.139	-6.1%
0.131	0.139	-5.5%
0.118	0.119	-1.1%

Tabla 5.3. Comparación de los periodos de vibrar de los modos dominantes de vibrar en todos los modelos, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Modelo	T (s)					
	Experimental			Numérico		
	Transversal	Longitudinal	Torsión	Transversal	Longitudinal	Torsión
0	0.568	0.568	0.481	0.568	0.568	0.481
1	0.556	0.500	0.455	0.540	0.494	0.449
2	0.435	0.385	0.345	0.427	0.389	0.351
3	0.256	0.238	0.208	0.250	0.243	0.216
4			0.556			0.514
5			0.476			0.433

Tabla 5.4. Diferencias de los periodos de vibrar obtenidos en los modelos físicos y en los modelos numéricos, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Modelo	T (s)		
	Transversal	Longitudinal	Torsión
0	0.02%	0.12%	-0.08%
1	2.80%	1.20%	1.22%
2	1.79%	-1.14%	-1.79%
3	2.50%	-2.06%	-3.68%
4			7.48%
5			9.07%

5.7. Respuestas numéricas

A continuación, se presentan las respuestas en función de la aceleración, obtenidas en la azotea de los modelos numéricos, figs. 5.16 a 5.21. Siendo consistente con la presentación de resultados experimentales, para los modelos 4 y 5, se calcularon las respuestas independientes para los planos resistentes rígido y flexible.

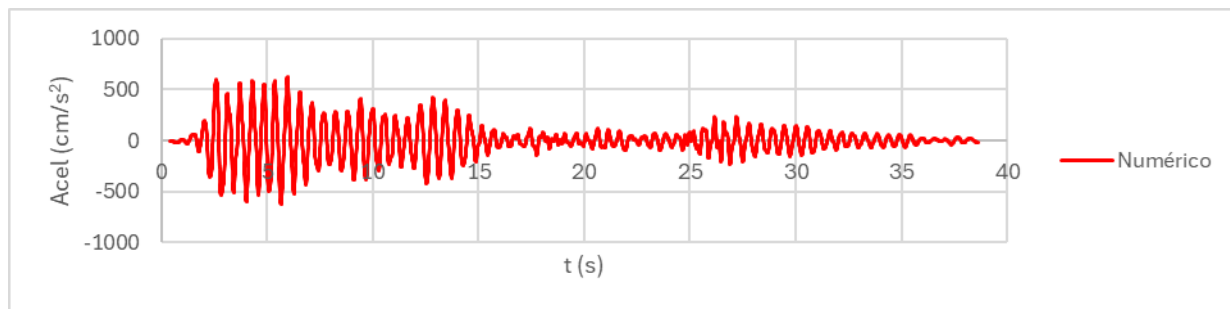


Figura 5.16. Aceleración en la azotea del modelo 0, obtenidas con el modelo numérico, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

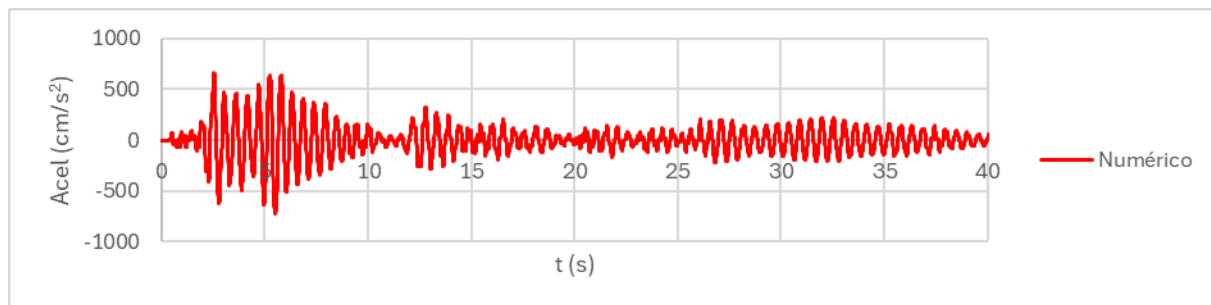


Figura 5.17. Aceleración en la azotea del modelo 1, obtenidas con el modelo numérico, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

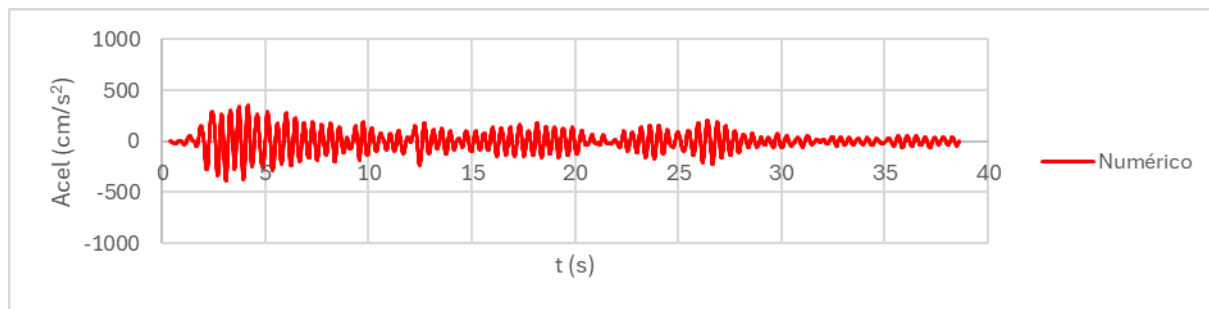


Figura 5.18. Aceleración en la azotea del modelo 2, obtenidas con el modelo numérico, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

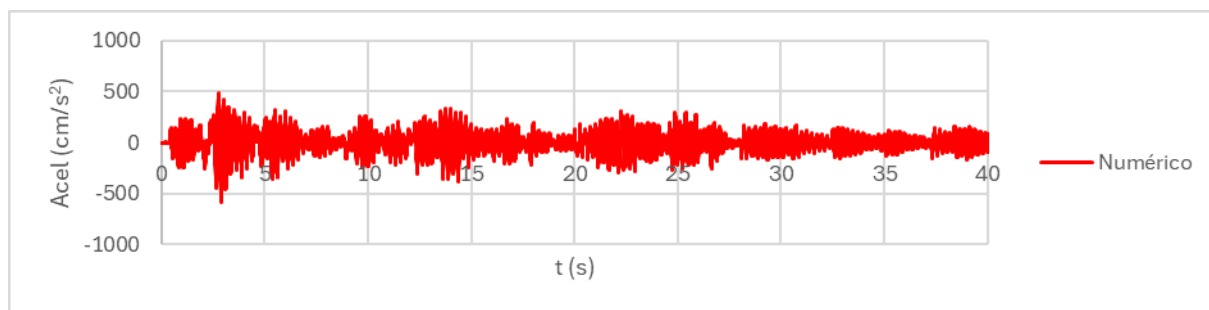
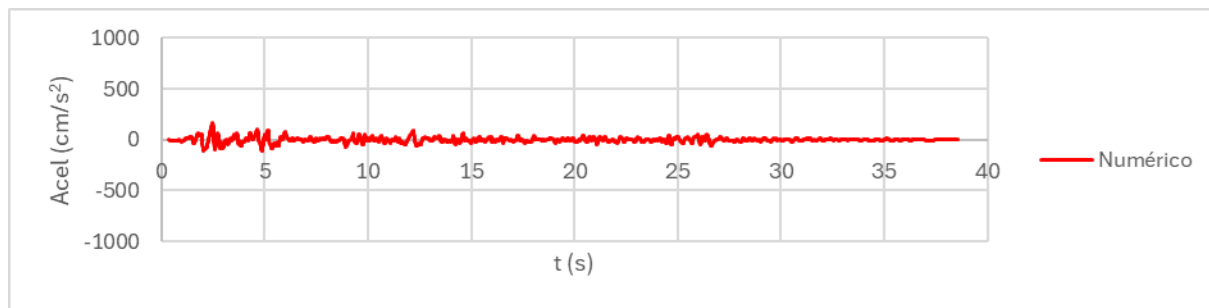
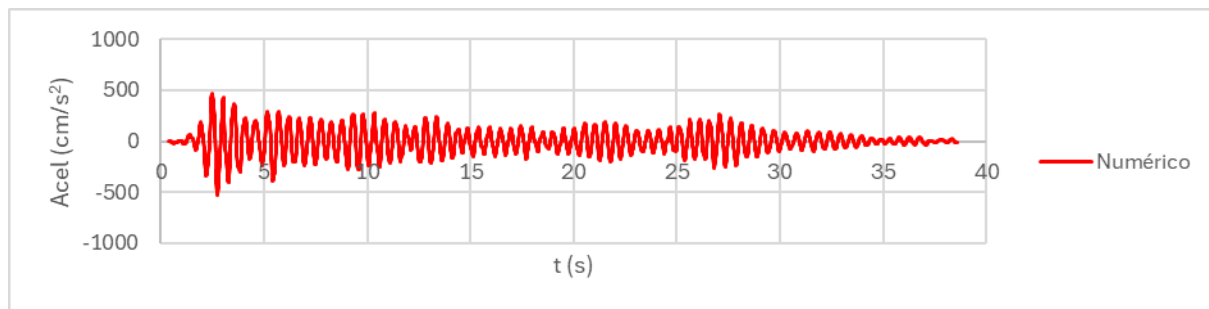


Figura 5.19. Aceleración en la azotea del modelo 3, obtenidas con el modelo numérico, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

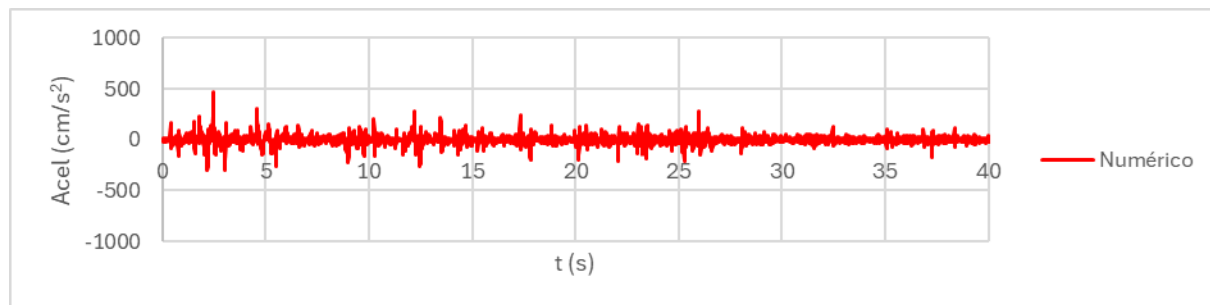


a) Lado rígido

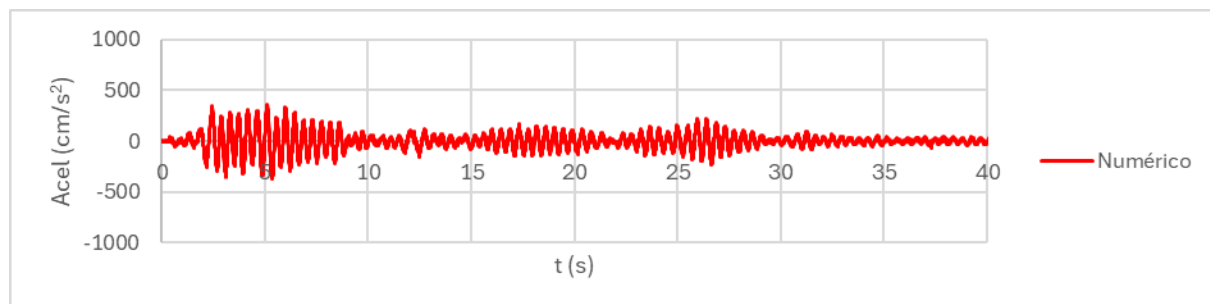


b) Lado flexible

Figura 5.20. Aceleración en la azotea del modelo 4, obtenidas con el modelo numérico, (García, O y Pontón, J. A. 2024).



a) Lado rígido



b) Lado flexible

Figura 5.21. Aceleración en la azotea del modelo 5, obtenidas con el modelo numérico, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

Capítulo 6. Análisis de resultados

6.1. Comparación de las respuestas numérica y experimental

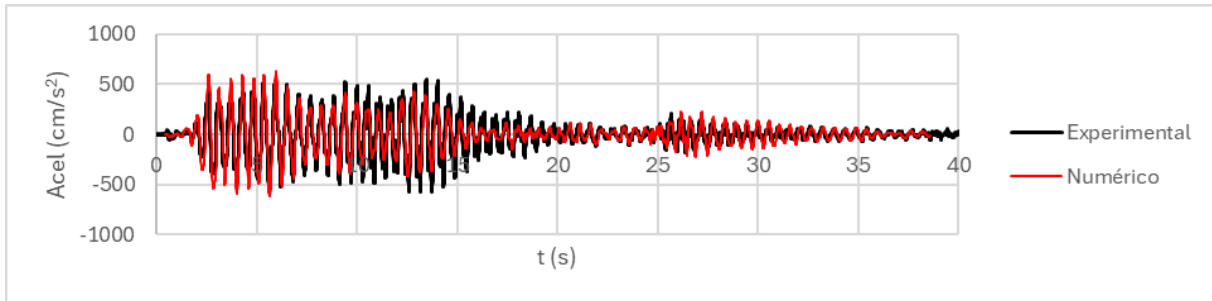


Figura 6.1. Comparación de la respuesta en la azotea del modelo M0, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

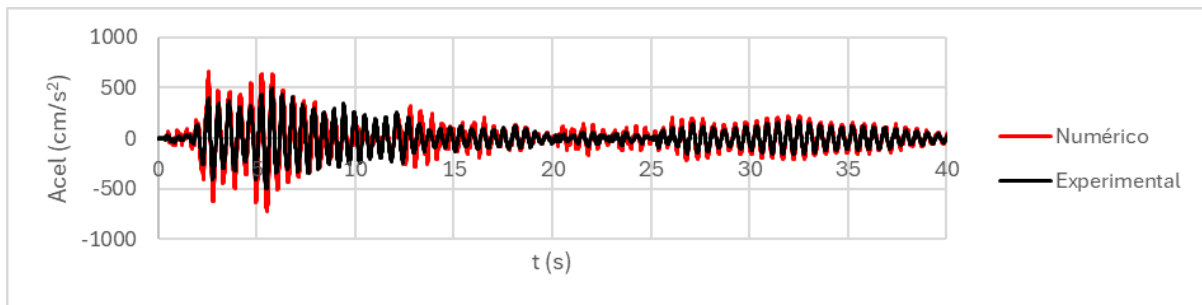


Figura 6.2. Comparación de la respuesta en la azotea del modelo M1, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

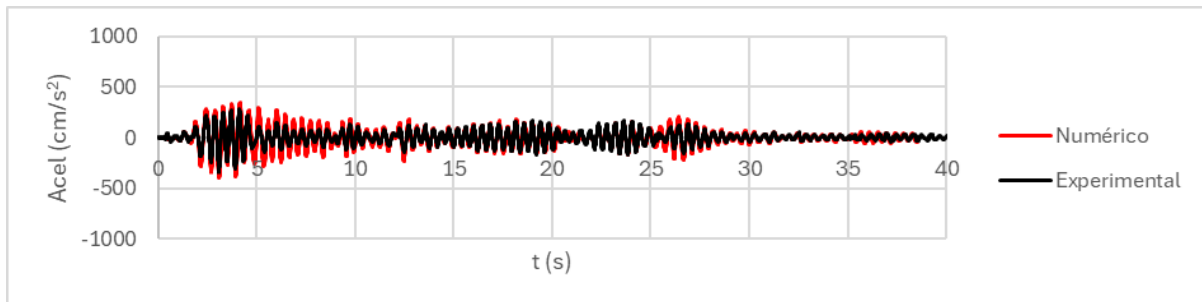


Figura 6.3. Comparación de la respuesta en la azotea del modelo M2, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

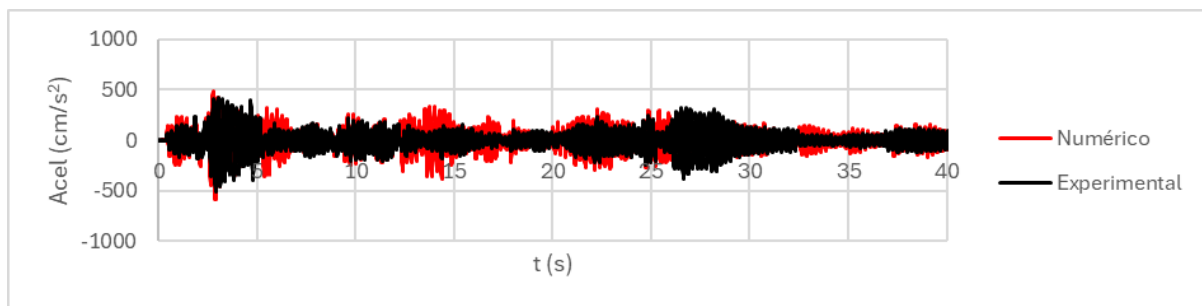
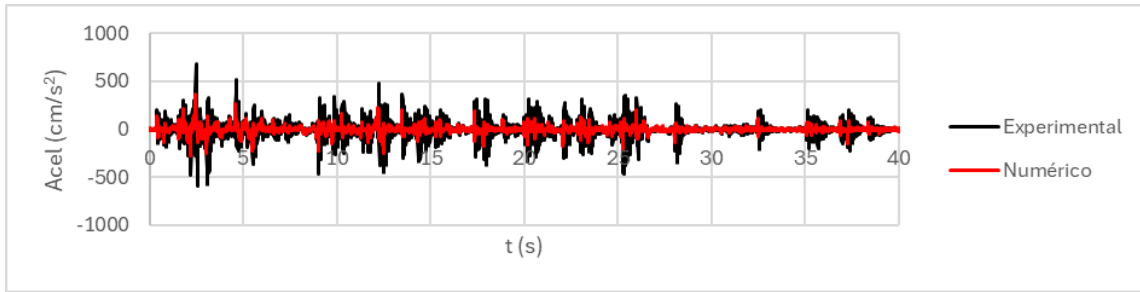
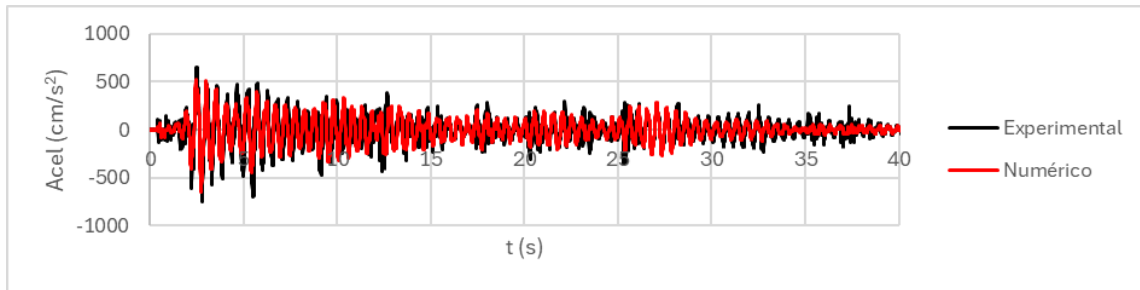


Figura 6.4. Comparación de la respuesta en la azotea del modelo M3, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

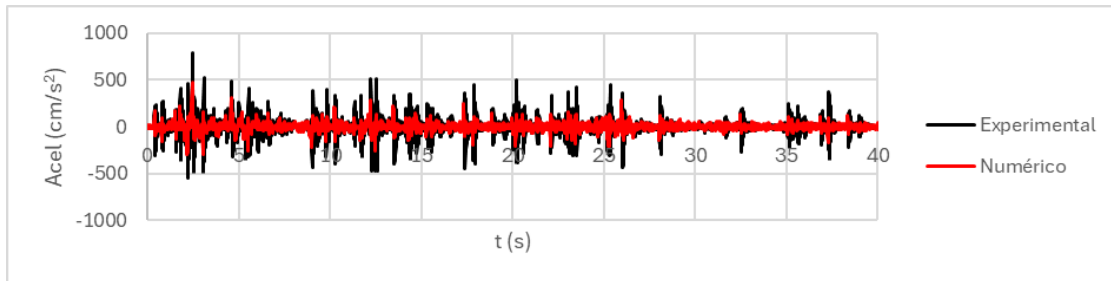


a) Lado rígido

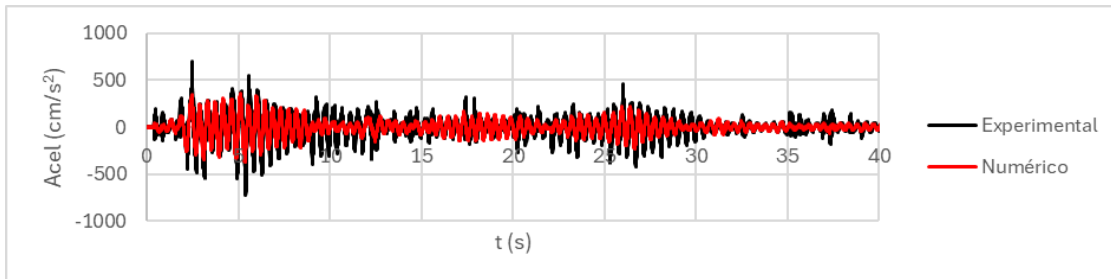


b) Lado flexible

Figura 6.5. Comparación de la respuesta en la azotea del modelo M4, considerando la aceleración real de la mesa como excitación en la base, (García, O y Pontón, J. A. 2024).



a) Lado rígido



b) Lado flexible

Figura 6.6. Comparación de la respuesta en la azotea del modelo M5, considerando la aceleración real de la mesa como excitación en la base, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

6.2. *Propiedades dinámicas de los modelos*

1. Se determinó el valor de las frecuencias modales empleando técnicas de Fourier. Para ilustrar el procedimiento empleado, se presentó un estudio detallado del análisis de correlación de señales para el caso del modelo de referencia (modelo 0). Los resultados anteriores permitieron calibrar los modelos numéricos, con los cuales se realizó la evaluación de la respuesta dinámica de los casos de estudio ante la excitación sísmica aplicada.
2. A partir de la respuesta experimental del modelo 0 en vibración libre, se determinó el porcentaje de amortiguamiento crítico correspondiente al primer modo de vibrar, ajustando una función exponencial al decremento logarítmico de su respuesta en vibración libre, obteniéndose un valor del 2%.

6.3. *Respuesta experimental*

1. Se validó que la excitación dinámica que se ingresa al sistema de control de la mesa vibradora fuera reproducida correctamente por el movimiento de su plataforma de trabajo. Lo anterior se realizó a través de la comparación de los espectros de Fourier de los acelerogramas de entrada y salida de la mesa vibradora, en los cuales se pudo observar que existe una muy buena coherencia para un rango de frecuencias entre 0 y 4 Hz, lo cual garantiza que no se generen efectos de amplificación importantes y, por ende, el registro de salida es confiable para el estudio de la respuesta numérica de los modelos.
2. Al comparar las respuestas experimentales de los modelos 1, 2 y 3 con la del modelo de referencia (modelo 0), fig. 6.7, video A2.6., se puede observar que estos exhiben un comportamiento desfavorable, caracterizado por los siguientes aspectos:
 - Existe una clara concentración de la demanda de desplazamiento lateral y deformaciones en los elementos estructurales de los entrepisos flexibles, comparada con la demanda que presenta el modelo 0, la cual se distribuye de manera relativamente uniforme en sus 3 entrepisos.
 - Comparando los desplazamientos de los modelos con entrepiso flexible (modelos 1, 2 y 3), se observa que el caso más desfavorable es el de la planta baja flexible. Lo anterior se puede atribuir a que en este se excita dinámicamente una mayor masa aportada por los entrepisos superiores, lo que produce un incremento en el periodo fundamental de vibrar y, en general, mayores desplazamientos. Caso contrario es el modelo 3, en el que el entrepiso flexible se ubica en el último entrepiso, en el que se observa que la demanda de desplazamientos fue menor a la del resto de los modelos, debido a que la masa de la parte superior es más pequeña. Esta configuración se asemeja a la de un edificio que posee un apéndice, donde la respuesta de este suele ser diferente a la de la estructura.

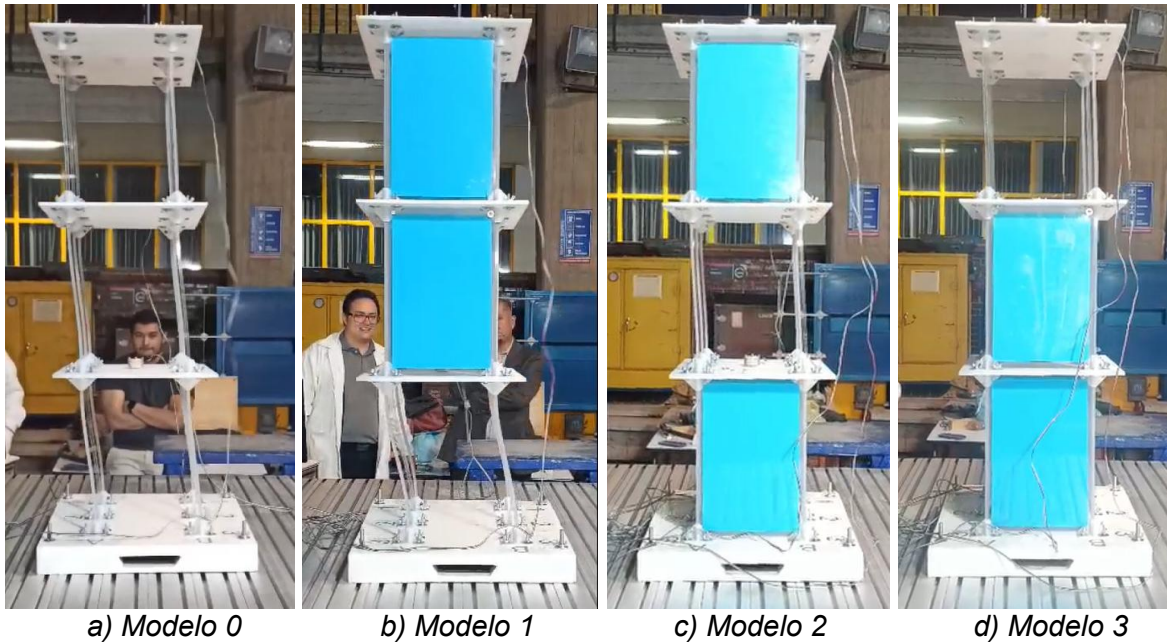


Figura 6.7. Comparación de la configuración deformada de los modelos 0, 1, 2 y 3, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

3. Al observar las respuestas de los modelos 4 y 5 se hacen evidentes las implicaciones de tener asimetrías en rigidez (modelo 4) y variaciones bruscas en la altura (modelo 5), particularmente en el entrepiso basal, fig. 6.8., video A2.6. Estas estructuraciones son típicas de un porcentaje importante de edificios en esquina. A continuación, se destacan los aspectos más relevantes:
 - Se consideró de interés presentar por separado la respuesta de los planos resistentes rígido y flexible, que ilustran los efectos tan desfavorables generados por el acoplamiento lateral torsional en estructuras que poseen distribuciones asimétricas en rigideces en su planta.
 - La estructuración del modelo 4 produce que el centro de torsión de los entrepisos se localice prácticamente en el cruce de los ejes que poseen muros, por lo que el comportamiento del edificio estará gobernado principalmente por modos torsionales, siendo las columnas de los ejes ubicados en el perímetro de la planta, sobre el lado flexible, las que experimentan las mayores demandas de desplazamiento relativo y, por ende, mayores concentraciones de fuerza cortante que se pueden traducir en daños.
 - La configuración propuesta en el modelo 5 intenta caracterizar un problema de distribución asimétrica en rigidez combinado con una planta baja débil. Es evidente que el comportamiento exhibe un acoplamiento lateral-torsional que concentra las demandas de desplazamiento, deformaciones y fuerza cortante en las columnas del lado flexible. En el ensayo realizado en la mesa vibradora se identifican tres fases intensas de la respuesta de este modelo, evidenciadas en las gráficas de respuesta, fig. 5.14.

- Si se observa con detalle del primer entrepiso, puede identificarse que las columnas del modelo 5 son mayormente demandadas respecto a las del modelo 4, lo que hace evidente que la presencia de cambios bruscos de rigidez combinada con entrepisos flexibles, particularmente en su planta baja, puede hacer aún más graves los efectos de torsión, que tradicionalmente han causado cuantiosos daños y colapsos en sismos de gran intensidad.

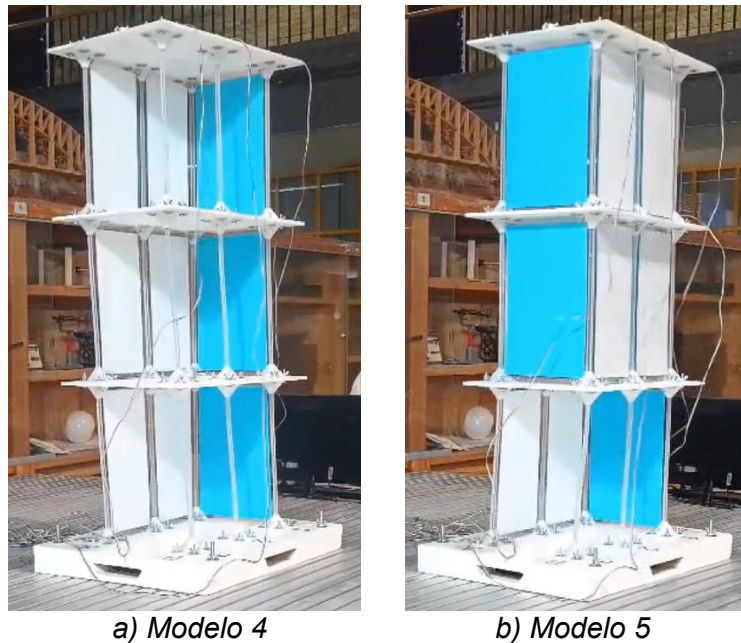


Figura 6.8. Comparación de la respuesta cualitativa de los modelos 4 y 5, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

6.4. Respuesta numérica

1. Dada la flexibilidad del modelo 0, con los arreglos de sensores diseñados, fue posible determinar las frecuencias asociadas a todos sus modos de vibrar. Para los modelos 1 a 5 se determinaron las frecuencias de vibrar de los modos dominantes en traslación y torsión. De los modelos con entrepiso flexible (modelos 1, 2 y 3), el que presentó el periodo más largo fue el correspondiente a la planta baja débil. Por otro lado, para los modelos de edificios en esquina (modelos 4 y 5), el que presentó el mayor periodo fue el edificio en esquina con distribución asimétrica en rigidez (modelo 4), característico de estructuras con fuertes efectos de torsión.
2. Las frecuencias modales obtenidas en los modelos numéricos son consistentes con las correspondientes a los modelos físicos, teniendo variaciones promedio del 2% para los modelos 0, 1, 2 y 3, así como del 8% para los modelos 4 y 5. Estos resultados indican que los modelos numéricos son adecuados para representar el comportamiento dinámico de los modelos físicos.

-
3. Al comparar las respuestas de aceleración en la azotea obtenidas experimentalmente vs las respuestas numéricas generadas por el software, se puede observar que hay una buena correspondencia de los resultados, tanto en la forma como en la amplitud, con excepción del modelo 3, en el cual el entrepiso flexible es el tercero. Lo anterior se puede atribuir a que la respuesta de este entrepiso está influenciada por altas frecuencias, donde la coherencia entre las señales de entrada y salida en la mesa vibradora no es satisfactoria.
 4. De la respuesta de aceleración obtenida para los modelos con entrepiso flexible (modelos 1, 2 y 3), es evidente que las mayores demandas se generan en el entrepiso con planta baja débil (modelo 1).
 5. Analizando las respuestas de los modelos 4 y 5 se observa que el primero está gobernado por un comportamiento fundamentalmente torsional donde el plano flexible presenta la mayor amplitud en demanda de aceleración; mientras que el modelo 5 experimenta una respuesta con tres fases intensas, lo cual es consistente con la respuesta experimental del modelo físico ensayado en la mesa vibradora, en el cual se pudo observar un acoplamiento lateral-torsional para diferentes valores de frecuencia, video A1-V13.
 6. Otro aspecto importante es que el contenido de frecuencias de la excitación sísmica aplicada generó una mayor exigencia para el modelo 4, lo cual es atribuible a que el periodo de vibración de este se encuentra en la zona con mayor contenido de energía del espectro de Fourier calculado para la señal que genera la mesa vibradora. Esta mayor respuesta también se puede inferir de las ordenadas espectrales que corresponden al periodo en el espectro de respuesta de dicho sismo.
 7. Respecto al comportamiento de los planos resistentes rígido y flexible de los modelos 4 y 5, es evidente que las mayores demandas torsionales se generan sobre el plano flexible.

Capítulo 7. Conclusiones

7.1. Conclusiones generales

En el diseño y desarrollo de este proyecto, se logró reproducir analíticamente e ilustrar con claridad a través de ensayos en mesa vibradora, la respuesta dinámica de diversos modelos físicos representativos de edificios con cambios bruscos de rigidez lateral en su altura y planta, sometidos a excitaciones armónicas de frecuencia creciente y a un sismo real con características en amplitud y contenido de frecuencias, que ocasionaron efectos dinámicos importantes.

Los prototipos o modelos físicos fueron diseñados para caracterizar y evidenciar algunas malas concepciones estructurales usadas en la práctica de la ingeniería para el diseño de edificaciones destinadas a vivienda, con objeto de sensibilizar a los estudiantes sobre las patologías estructurales que se generan cuando se tienen entrepisos flexibles, en particular, la llamada “planta baja débil” y sus combinaciones con estructuraciones irregulares susceptibles a experimentar efectos torsionales, típicas de edificios en esquina.

Los modelos estructurales ensayados en la mesa vibradora evidenciaron la complejidad del comportamiento dinámico de sistemas de varios grados de libertad cuando se tienen cambios bruscos de rigidez lateral. Se espera que el amplio material videográfico desarrollado para su visualización en medios digitales, combinado con la realización de ensayos demostrativos en el laboratorio para los casos de mayor interés, sea incorporado como un elemento dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje para fortalecer los conocimientos teóricos vistos en clases en las asignaturas relacionadas con el análisis y diseño sísmico de estructuras impartidas en la carrera de Ing. Civil, tales como Análisis Estructural, Diseño Estructural, Ingeniería Sísmica, Estructuras de Concreto y Estructuras de Mampostería, (García, O y Pontón, J. A. 2024).

7.2. Conclusiones particulares

De la revisión del contexto de la problemática y de los resultados teórico-prácticos del proyecto, se presentan las siguientes conclusiones particulares, (García, O y Pontón, J. A. 2024):

1. Del análisis de la estadística de daño y/o colapsos generados por sismos de gran intensidad, en particular el ocurrido en la Cd. de México el del 19 de septiembre de 2017, se pueden destacar los siguientes resultados, (SÍSÉ, 2025):
 - El mayor porcentaje de colapsos ocurrió en edificios de 5 pisos.
 - El tipo de sistema estructural que presentó los mayores daños y/o colapsos fue el de “columnas y losas planas de concreto”, seguido del sistema de “muros de mampostería confinada”.
 - El colapso de edificaciones construidas antes de 1985 fue de 4.5 veces mayor que el de las construidas después de 1985.
 - Según su uso, el 49 % de las estructuras colapsadas en el S19-2017, fueron “edificios de departamentos”.

- La Alcaldía con el porcentaje más alto de colapsos fue Benito Juárez con 32%, seguido de Cuauhtémoc y Coyoacán con 20% y 15% respectivamente.

Las malas experiencias que nos han dejado este tipo de fenómenos naturales, hace necesario que los alumnos de la carrera de Ingeniería civil que deseen laborar en el área de diseño estructural, deben sensibilizarse lo mejor posible sobre la importancia de proponer una buena concepción estructural, en particular para las edificaciones destinadas para uso habitacional, en las que las necesidades de la sociedad han obligado a algunos desarrolladores inmobiliarios a anteponer aspectos estéticos, funcionales y de espacios, sobre la seguridad estructural.

- La adecuada instrumentación de los modelos y su ensaye en la mesa vibradora, permitieron determinar confiablemente los periodos y formas modales de vibrar para garantizar que el modelo numérico represente razonablemente bien al modelo físico y con ello poder estudiar su respuesta analítica ante diferentes condiciones de carga estáticas y dinámicas.
- La aplicación de una señal armónica de frecuencia creciente a través de la mesa vibradora permitió excitar e ilustrar claramente las diferentes configuraciones modales de los prototipos, lo cual es altamente formativo para que los estudiantes comprendan la física del problema y se sensibilicen sobre el comportamiento de las estructuras ante excitaciones dinámicas y los parámetros que lo subordinan, lo cual comúnmente se observa mediante simulaciones realizadas con programas comerciales. En el anexo 2, se muestra una colección de videos de los seis modelos estudiados, que muestran sus diferentes formas modales.
- El valor del 2% del porcentaje de amortiguamiento crítico obtenido de la respuesta del modelo 0, se considera razonable ya que los modelos diseñados que cuentan con pocos mecanismos de disipación de energía. Este porcentaje se asemeja mucho al que suelen poseer las estructuras de acero.
- Del análisis de resultados derivados de los ensayos de los modelos utilizados para caracterizar cambios bruscos de rigidez en planta y elevación, que generan la aparición de entrepisos flexibles se presentan las siguientes conclusiones:
 - Se logró muy buena correspondencia entre las respuestas obtenidas experimentalmente y las calculadas numéricamente, tanto en la forma como en la amplitud, lo cual hace evidente que la metodología experimental y el procedimiento analítico fueron correctamente realizados.
 - El periodo fundamental de vibrar del modelo 1 (con planta baja débil) fue similar al del modelo de referencia (sin muros) y estuvo subordinado por las propiedades de los elementos del entrepiso basal; el incremento en rigidez de los entrepisos superiores no le indujo una variación importante.
 - El comportamiento estructural más desfavorable generado por cambios bruscos de rigidez lateral en la altura (modelos 1,2 y 3), dado por la concentración de deformaciones en las uniones de elementos y distorsiones de entrepiso, fue experimentado por el modelo de planta baja débil (modelo 1). A diferencia del

modelo sin muros (modelo 0) donde la disipación de energía se distribuye de forma relativamente uniforme en la estructura, el modelo de planta baja débil (modelo 1) la concentra en el primer entrepiso, generando una condición de alta demanda en las conexiones de sus elementos con el sistema de piso. No en vano esta patología fue una de las causas más importantes de los graves daños y colapsos que ocurrieron en edificaciones destinadas a vivienda, en el 19S-2017.

- Los cambios bruscos de rigidez dados por una disminución de esta en los últimos entrepisos, como el caso del modelo 3, generaron un comportamiento semejante al de un apéndice.
2. Las respuestas experimentales de los modelos 1 a 5, hacen evidente porqué las edificaciones que poseen patologías dadas por cambios bruscos de rigidez lateral en planta y elevación, exhiben comportamientos complejos y desfavorables que pueden comprometer su seguridad estructural.
 3. Respecto al comportamiento de los modelos con distribución asimétrica en rigidez en planta y elevación se encontró que la existencia de los muros en los entrepisos superiores del modelo 5, si bien incrementan la rigidez torsional del sistema estructural, acentúan aún más los efectos dañinos generados por la torsión sísmica, caracterizada por el modelo 4 y los efectos de la planta baja débil exhibidos en el modelo 1.
 4. Los ensayos experimentales y los resultados analíticos de los modelos estudiados ilustraron claramente porqué la llamada “planta baja débil” y su eventual combinación con una distribución irregular de rigideces en planta, fue una de las causas más importantes de los graves daños y colapsos que ocurrieron en edificaciones destinadas a vivienda, en el 19S-2017. Ver material videográfico del anexo 2.

En la actualidad, el análisis del comportamiento sísmico de las estructuras se ha optimizado significativamente gracias al avance de las herramientas computacionales, que permiten realizar simulaciones detalladas de manera eficiente y accesible para el estudio de problemáticas complejas como las expuestas en este proyecto. Sin embargo, se reitera que, para que los estudiantes puedan aprovechar plenamente estos desarrollos tecnológicos, es necesario que primeramente comprendan a fondo los principios físicos que rigen la dinámica estructural y que se sensibilicen de su importancia para caracterizar el comportamiento de las estructuras sometidas a excitaciones sísmicas. En este contexto, la utilización de modelos físicos juega un papel clave en su formación, ya que facilita la visualización y el entendimiento de los fenómenos involucrados. A lo largo del proyecto, se demostró la efectividad de este enfoque, validando la relevancia que puede tener en el proceso de enseñanza-aprendizaje, para hacer frente a los retos de formación de recursos humanos que demanda el ejercicio responsable de la profesión para atender las crecientes necesidades sociales.

7.3. Impacto del Servicio Social en mi formación académica y profesional

El desarrollo de este programa tuvo un impacto significativo a distintos niveles en mi formación académica y profesional; el participar activamente en todas las etapas del programa, representó una valiosa oportunidad de aprendizaje tanto técnico como en el desarrollo de habilidades blandas.

En el ámbito académico, desarrollé una comprensión más profunda de los principios de dinámica estructural y cómo es que las propiedades dinámicas de las estructuras definen el comportamiento de estas en presencia de sismos, estudiados en las asignaturas de Diseño Estructural e Ingeniería Sísmica de la carrera; además comprendí el funcionamiento de herramientas experimentales como la mesa vibradora e instrumentación de modelos físicos con sensores MEMS. Asimismo, adquirí experiencia en la modelación computacional en softwares comerciales para el desarrollo de modelos analíticos, en la calibración de modelos numéricos mediante modelos físicos, y amplí mis conocimientos en el uso del software especializado AutoCAD, al crear modelos en 3D. La posibilidad de comparar los resultados experimentales con los obtenidos en simulaciones numéricas me permitió comprender la importancia de utilizar herramientas de análisis predictivo antes de ejecutar obras en campo, lo cual resulta fundamental para garantizar la seguridad estructural.

Además de las competencias técnicas, desarrollé habilidades prácticas como el manejo de herramientas manuales, las cuales fueron utilizadas en la fabricación de los seis modelos físicos; al igual que habilidades de comunicación, con la redacción de informes técnicos y la edición de material audiovisual para la divulgación del conocimiento.

En conjunto, esta experiencia me brindó una formación integral, fortaleciendo mis capacidades analíticas, técnicas, comunicativas y colaborativas, todas ellas fundamentales para el ejercicio profesional de la ingeniería civil.

Este acercamiento a una problemática real y sensible me permitió desarrollar una conciencia crítica y empática sobre el impacto social de la ingeniería civil. Al abordar temas relacionados con la seguridad estructural en zonas vulnerables, el programa fomentó en mí, una visión ética y comprometida con el bienestar de la población.

Finalmente, la experiencia me reforzó el sentido de responsabilidad social que debe tener un ingeniero civil, promoviendo una actitud proactiva hacia la mitigación del riesgo sísmico y el diseño de infraestructura más segura, resiliente y equitativa.

7.4. Agradecimientos

Expreso mi reconocimiento y agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México ya que a través de programas institucionales como el Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación (PAPIME) de la dirección general de personal académico, es posible desarrollar este tipo de proyectos (proyecto "Instrumentación y ensaye en mesa vibradora de modelos físicos representativos de edificios con reducciones bruscas de rigidez lateral") de alto impacto en la formación de estudiantes de ingeniería que se traducirán en la formación de mejores profesionales en beneficio de la sociedad.

Referencias

- Bazán, & Meli. (2016). *Diseño sísmico de edificios*. Limusa S.A. de C.V.
- Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (1993). *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. J. Wiley.
- Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures* (Fourth Edition). Wiley & Sons, Inc.
- Berrón, R. (2018). "Sismo del 19 septiembre de 2017" (The September 19, 2017 Earthquake). XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Campeche, México.
- Castelán, I. (2001). *Determinación experimental de las propiedades dinámicas de un edificio reforzado con disipadores de energía* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chávez Cano, M. M. (2010). *Validación experimental de modelos analíticos para el estudio del comportamiento sísmico de estructuras históricas* [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chu, E. (2008). *Discrete and Continuous Fourier Transforms: Analysis, Applications and Fast Algorithms*. CRC Press.
- Departamento de Estructuras (2019). "Instalación, puesta en marcha y operación de una Mesa Vibradora en el Laboratorio de Materiales Miguel Madinaveitia", Proyecto interno, DICyG-FI, UNAM.
- Gaceta Digital de la Facultad de Ingeniería, UNAM (octubre, 2017). La DICyG al servicio de la sociedad. Época 2 Año 2 No. 14.
- García, O y Pontón, J. A. (2024). "Instrumentación y ensaye en mesa vibradora de modelos físicos representativos de edificios con reducciones bruscas de rigidez lateral", Informe PAPIME PE113224, DGAPA, UNAM.
- Pontón, J.A. (2020). *Estudio del comportamiento dinámico torsional de un modelo estructural asimétrico a escala en mesa vibradora*. Tesis de Maestría de Estructuras, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.
- Laboratorio de Materiales de Estructuras (2019). *Manual de Operación Equipo, Mesa Vibradora*, Facultad de Ingeniería División De Ingenierías Civil y Geomática, UNAM.
- SÍSÉ (2025) Empresa especializada en Ingeniería Sísmica, www.si-se.mx

Anexos

ANEXO 1. Fabricación de modelos estructurales físicos

Desarrollo conceptual de los modelos.

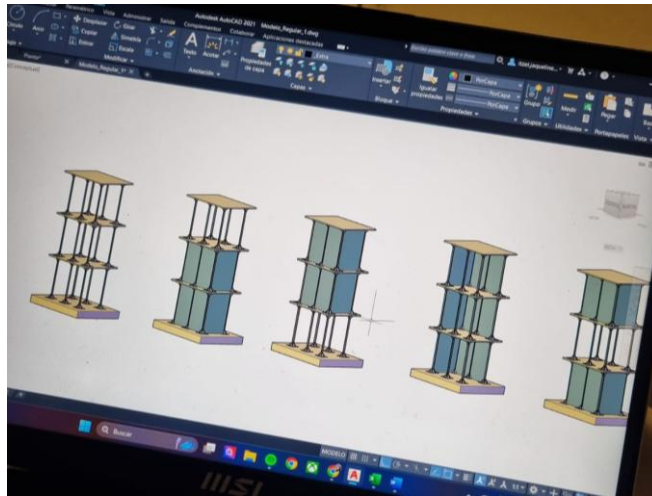


Figura A1.1. Selección del diseño de los modelos estructurales.

Fabricación de los modelos físicos



Figura A1.2. Corte de paredes de acrílico para los modelos físicos.



Figura A1.3. Pruebas de los muros de acrílico elaborados.

ANEXO 2. Material videográfico

En este apartado se presentan los videos del ensaye de 6 modelos físicos de 3 niveles, con patologías estructurales asociadas a cambios bruscos de rigidez de lateral en la planta y elevación, denominados Modelos 0, 1, 2, 3, 4 y 5. Los videos muestran la respuesta de los modelos ante diferentes tipos de excitación:

- Vibración libre
- Función armónica de frecuencia creciente
- Excitación sísmica “El Centro”



Figura A2.1. Demostración de los modelos físicos.

A continuación, se presenta las listas de reproducción y sus ligas donde se ubican los videos desarrollados en el canal de youtube del Departamento de Estructuras:

1. MODOS DE VIBRAR. Modelos con cambios bruscos de rigidez lateral.

Lista de videos:

- Modelo 01. MODOS DE VIBRAR. Modelo de edificio con "planta baja débil"
- Modelo 02. MODOS DE VIBRAR. Modelo de entrepiso flexible
- Modelo 03. MODOS DE VIBRAR. Modelo con entrepiso superior flexible
- Modelo 04. MODOS DE VIBRAR. Modelo con asimetría estructural en planta
- Modelo 05. MODOS DE VIBRAR. Modelo asimétrico en planta y en elevación

Enlace: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLwDLcgMtHLKj2crraJGmxGgL-pUf5H-XF>



Figura A2.2. Material audiovisual de modos de vibrar de los modelos físicos.

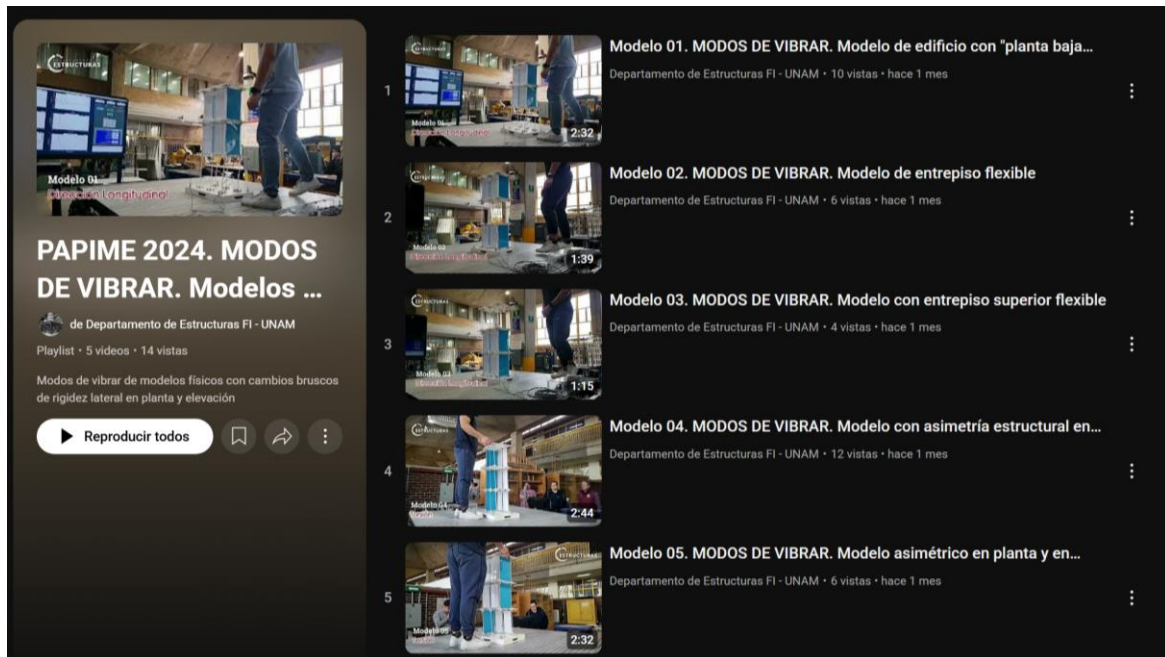


Figura A2.3. Lista de YouTube de modos de vibrar.

2. EXCITACIÓN DE MODOS DE VIBRAR. Modelos con asimetría en planta y elevación

Lista de videos:

- Modelo 0. EXCITACIÓN DE MODOS DE VIBRAR. Modelo esquelético de 3 niveles
- Modelo 04. EXCITACIÓN DE MODOS DE VIBRAR. Modelo con asimetría en planta
- Modelo 05. EXCITACIÓN DE MODOS DE VIBRAR. Modelo asimétrico en planta y elevación

Enlace: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLwDLcgMtHLKgkpb8Z4cJh0JDCejxLx4iV>

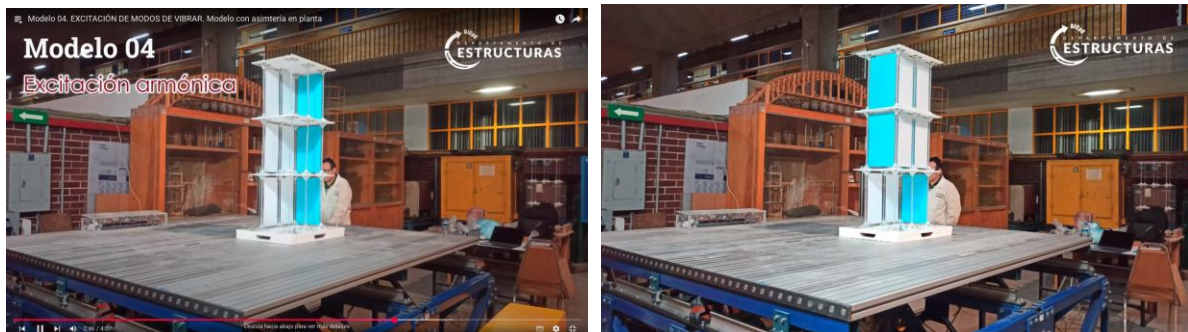


Figura A2.4. Material audiovisual de excitación de modos de vibrar de los modelos físicos.

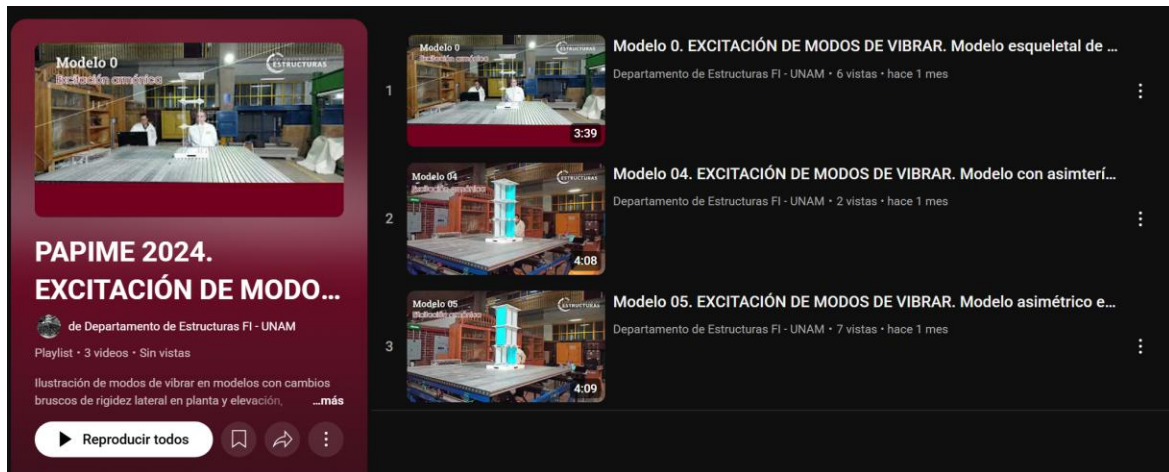


Figura A2.5. Lista de YouTube de excitación de modos de vibrar.

3. RESPUESTA DINÁMICA ANTE SISMO. Modelos con cambios bruscos de rigidez lateral.

Lista de videos:

- Modelo 0. Respuesta de modelo de 3 niveles. Sismo de "El Centro"
- Modelo 01. "Planta baja débil". Sismo "El Centro"
- Modelo 02 Entrepiso flexible. Sismo "El Centro"
- Modelo 03. Entrepiso superior flexible. Sismo "El Centro"
- Modelo 04. Cambios de rigidez en planos resistentes. Sismo "El Centro"
- Modelo 05. Planta baja débil con asimetría en planta. Sismo "El Centro"
- Comparación de la respuesta sísmica de modelos de edificios con entrepiso flexible
- Comportamiento dinámico de modelos de edificios en esquina.

Enlace: https://www.youtube.com/playlist?list=PLwDLcgMtHLKhV8gl_M9VTSbo5ZyhuIV1

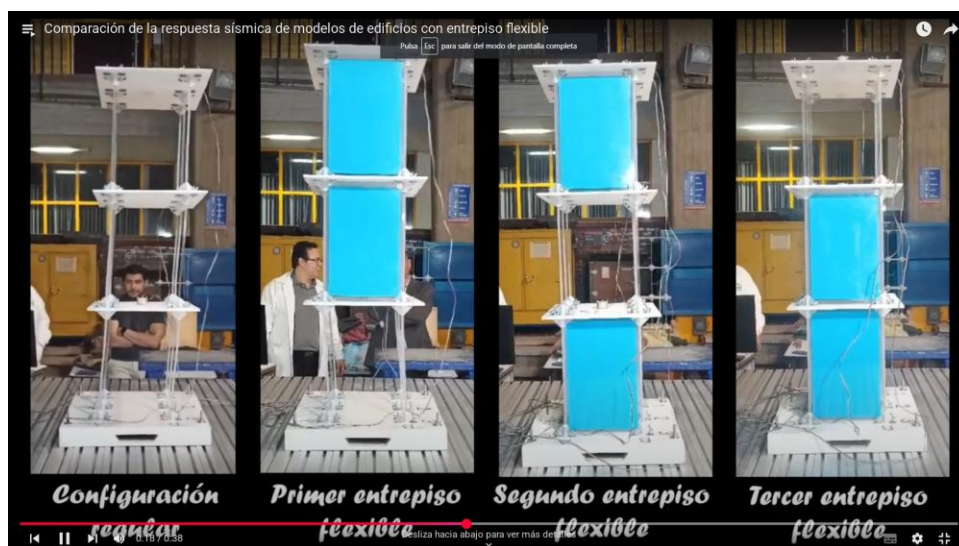


Figura A2.6. Material audiovisual comparando la respuesta sísmica de los diferentes modelos.

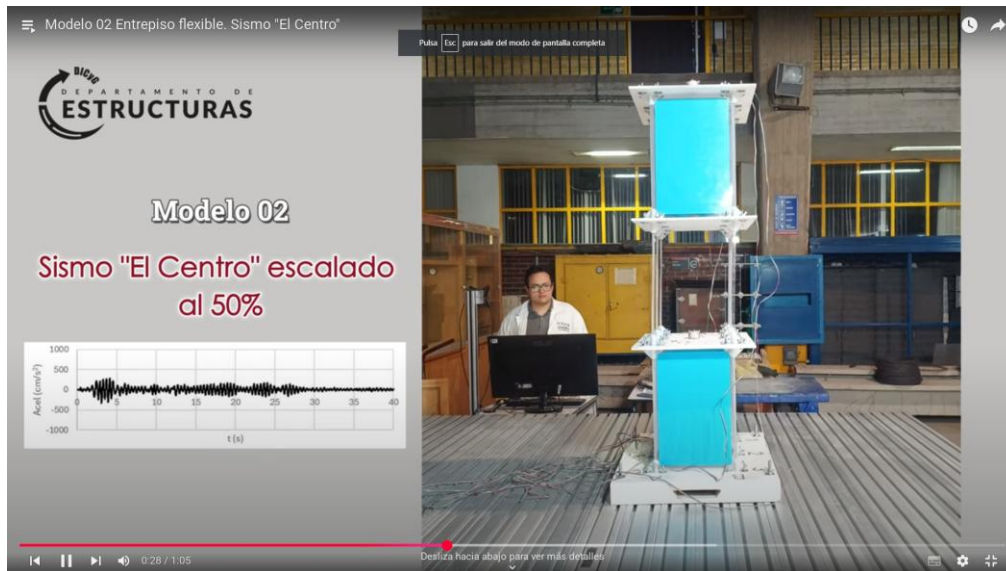


Figura A2.7. Respuesta sísmica del modelo 02.

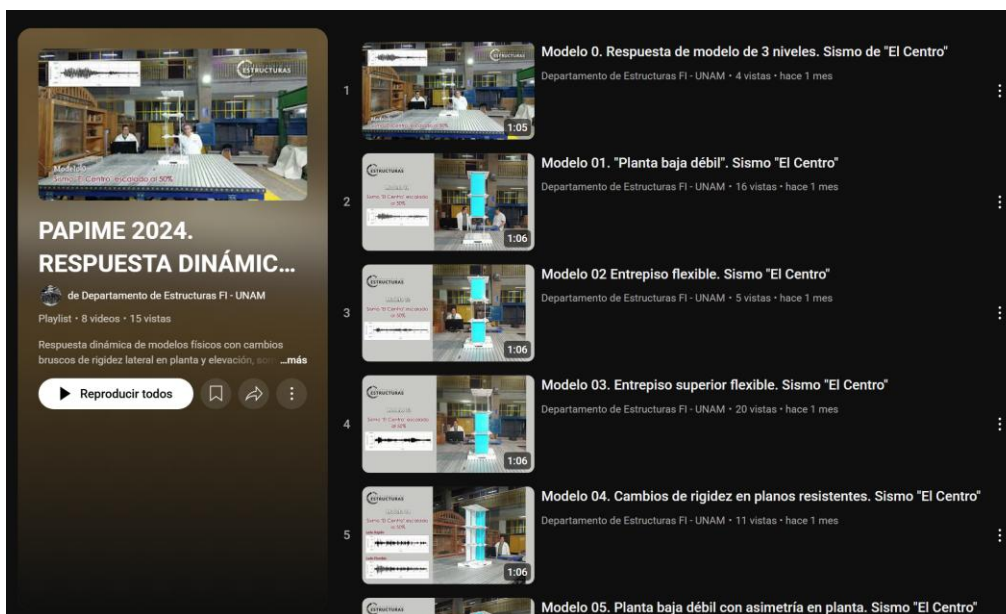


Figura A2.8. Lista de reproducción de YouTube.