



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de una práctica de
laboratorio en mesa vibradora para
el entendimiento del fenómeno de
torsión sísmica en edificios, dirigida
a estudiantes de Ingeniería Civil**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Hebe Escalante González

DIRECTOR DE TESIS

M. en I. José Antonio Pérez Pontón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**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 DISEÑO DE UNA PRACTICA DE LABORATORIO EN MESA VIBRADORA PARA EL ENTENDIMIENTO DEL FENOMENO DE TORSION SISMICA EN EDIFICIOS. DIRIGIDA A ESTUDIANTES DE INGENIERIA CIVIL. 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.



HEBE ESCALANTE GONZALEZ
Número de cuenta: 310034924

DEDICATORIA

A mi compañero de vida **Pedro**,
por caminar a mi lado entre
dificultades, cambios y certezas.
Tu amor, fuerza y fe en lo que somos
me alientan todos los días a seguir
adelante.

A mi madre **Silvia**,
por estar incluso en la incertidumbre, el
desánimo y la distancia.
Gracias por no soltar mi mano, por
apoyarme incluso cuando no ha sido
fácil.

A mi padre **Ignacio**,
por enseñarme a mirar el mundo con
otros ojos. Tu ejemplo me formó, tu
visión me acompaña.

A mi abuela **Flor**,
por tu amor tan incondicional que
persiste más allá del tiempo.

A mi abuelo **Ignacio**,
por el legado de tu esfuerzo.
Gracias a tu trabajo y grandes
sacrificios hoy podemos estar aquí.

A mis padrinos **Angélica** y **Javier**
por su afecto, apoyo y confianza.
Gracias por querernos tanto a mí y a
Elo.

A mis primos **Ale**, **Carlitos** y **Fabi**,
por su amabilidad, su compañía y por
haber sido, de alguna forma, los
hermanos con quienes compartí mi
niñez.

A mi cuñado **Daniel**,
por tu amabilidad y apoyo en los
momentos difíciles.

A mi gran amigo **José**,
gracias por rescatarme tantas veces,
por seguir haciendo realidad el sueño
de la docencia y por las muchísimas
horas que hemos trabajamos juntos.

Al profesor **Ricardo Reyes**,
por tus enseñanzas, el ejemplo de tu
vocación y tu amistad que son
tesoros para mí.

A lo mejor que me regaló el CCH, mis
grandes amigos: **Benjamín**,
Angélica, **Yarím** e **Isabel** y a sus
compañeros de vida, **Chris**, **Héctor**,
Angie y **Fer**. Gracias por todo el
amor, los buenos momentos y por los
muchos años que nos hemos
mantenido juntos.

A mis grandes amigos, hermanos y
colegas: **Elenita**, **Paty**, **Alan**,
Eduardo, **Alejandro**, **Héctor**, **Bere**,
Jerry, que se son una parte tan
importante de mi vida, que los adoro
y les agradezco su compañía en todas
las etapas que hemos compartido.

A mi hermana **Eloísa**,
mi compañera incansable y leal.
Gracias por tu amor y complicidad y
por el regalo que son mis sobrinos.

A mi abuela **Rebeca**,
por tus consejos, tu cariño sereno y tu
manera divertida y sin juicios de
querernos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México,
por el apoyo y las herramientas brindadas durante todos mis estudios y mi
desarrollo profesional. Gracias por permitirme continuar mi formación académica y
docente.

A la **Facultad de Ingeniería** por su disposición y apoyo en el uso de las
herramientas necesarias para el desarrollo de este proyecto.

Al alumno Tlacaélel Caballero Cárdenas y demás colaboradores,
que participaron en el desarrollo experimental.

A mis sinodales, M.I Margarita Puebla Cadena, M.I. José Antonio Pérez Pontón,
M. I. Héctor Javier Guzmán Olguín, M. I. Miguel Ángel Rodríguez Vega,
M.I. Adriana Yolojóchil Jiménez Rodríguez por sus consejos y observaciones,
que enriquecieron este trabajo.

A la profesora **M.I. Mayverena Jurado Pineda**, por su apoyo durante mi ejercicio
profesional. Admiro y respeto profundamente su trabajo.

Al profesor **Ing. Gabriel Alejandro Jaramillo Morales**, por sus atenciones y apoyo
recibidos durante los años laborados bajo su guía.

CONTENIDO

DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS.....	3
INTRODUCCIÓN	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	9
OBJETIVOS Y ALCANCES	10
1. ASPECTOS PEDAGÓGICOS EN LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL.....	11
1.1. Enfoques pedagógicos en la enseñanza de la Ingeniería Civil	12
1.2. Estado de la docencia actual y los retos que enfrenta	14
2. FUNDAMENTOS DEL FENÓMENO DE TORSIÓN EN EDIFICIOS	16
2.1. Aspectos generales del diseño sísmico de edificios	16
2.2. Aspectos básicos de la torsión sísmica de edificios	16
2.2.1. Descripción del fenómeno físico	16
2.3. Cálculo de los lugares geométricos involucrados en el fenómeno de torsión	17
2.3.1. Centros de torsión.....	17
2.3.2. Centro de masa y de cortante.....	20
2.4. Aspectos normativos	20
3. LA EXPERIMENTACIÓN EN MESA VIBRADORA COMO HERRAMIENTA DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA.....	22
3.1. Beneficios de la experimentación con mesa vibradora en la comprensión de fenómenos estructurales	24
3.2. Aplicaciones en la enseñanza de la ingeniería civil.....	25
3.3. La mesa vibradora del laboratorio de materiales. Funcionamiento básico y especificaciones técnicas	26
4. METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA.....	28
4.1. Definición de objetivos de aprendizaje y pertinencia de la implementación práctica....	28
4.2. Rol de la institución, estudiante y docente en la facilitación de la práctica.....	30
4.3. Descripción de la metodología	31
4.4. Fase 1: Diseño y construcción del modelo estructural físico.....	32
4.4.1. Modelo de referencia (M0).....	32
4.4.2. Modelos asimétricos en rigidez (M1, M2 y M3)	34
4.5. Fase 2: Caracterización de los materiales.....	37

AGRADECIMIENTOS

4.6.	Fase 3: Desarrollo del modelo numérico	37
4.7.	Fase 4: Protocolo experimental	38
4.7.1.	Revisión del estado del equipo y definición de parámetros del sistema de control para la operación de la mesa vibradora	39
4.7.2.	Verificación de la correcta operación de sensores y canales de comunicación.	40
4.7.3.	Diseño de los arreglos de sensores con base en el comportamiento o fenómeno a estudiar. 41	
4.7.4.	Determinación experimental de las propiedades dinámicas del modelo físico	42
4.7.5.	Calibración del modelo analítico con base en resultados experimentales.....	47
4.7.6.	Selección de la excitación sísmica.....	51
4.7.7.	Verificación de la congruencia entre las señales de entrada y salida de la mesa vibradora.	52
4.8.	Fase 5: Ensayo dinámico	53
4.9.	Fase 6: Análisis comparativo y validación de la metodología.....	56
5.	MANUAL DE PRÁCTICA: “TORSIÓN SÍSMICA ELÁSTICA DE EDIFICIOS”	59
5.1.	Objetivo	59
5.2.	Seguridad en la ejecución	59
5.3.	Marco teórico	59
5.3.1.	Aspectos generales del diseño sísmico de edificios.....	59
5.3.2.	Torsión sísmica en edificios.....	60
5.3.3.	Cálculo del centro de torsión	61
5.3.1.	Centro de masa y de cortante.....	64
5.3.2.	Aspectos normativos.....	64
5.4.	Materiales	66
5.5.	Equipo	66
5.6.	Características de los modelos que se ensayarán	66
5.7.	Desarrollo de la práctica	68
5.8.	Conclusiones y comentarios finales.....	71
5.9.	Bibliografía	71
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
	REFERENCIAS.....	74
	ANEXOS	76
	A1. Determinación de los centros de torsión de los modelos empleando el método matricial ..	77
	A.1.1 Datos generales para los tres modelos.	78

A.1.2	Modelo M1.....	81
A.1.3	Modelo M2.....	85
A.1.4	Modelo M3.....	89

INTRODUCCIÓN

La alta sismicidad característica de México impone un reto constante a la Ingeniería Civil y en particular a la Ingeniería Estructural, demandando profesionales con una comprensión profunda del comportamiento dinámico de las estructuras con el fin de realizar diseños seguros y resilientes.

Entre los fenómenos más críticos y complejos del comportamiento dinámico de las estructuras ante un evento sísmico se encuentra la torsión sísmica, que es un efecto dinámico que surge de asimetrías en la rigidez o masa de los edificios, y que ha sido responsable de numerosos daños estructurales en sismos pasados. Desafortunadamente, la enseñanza tradicional de este fenómeno se ha visto limitada a modelos teóricos y, en el mejor de los casos, a simulaciones numéricas, haciendo difícil para el estudiante internalizar su verdadero impacto.

Frente a esta problemática, la implementación del aprendizaje basado en la experimentación física se puede aplicar en la mesa vibradora, como una herramienta pedagógica que apoya al estudiante de licenciatura, permitiendo trasladar conceptos abstractos como el acoplamiento traslacional-torsional o la influencia de la excentricidad estructural a un plano tangible y observable. La experimentación permite acercar la teoría y la práctica en la formación de ingenieros civiles, aprovechando en este caso la infraestructura del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

En el presente trabajo se diseña una práctica de laboratorio en mesa vibradora para que los estudiantes de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la UNAM comprendan el fenómeno de la torsión sísmica elástica de edificios. Se comienza con la presentación de aspectos pedagógicos de la enseñanza de la Ingeniería Estructural, se tratan los fundamentos del fenómeno de la torsión sísmica de edificios, se trata la experimentación de la mesa vibradora como herramienta de investigación y enseñanza, se aplica una metodología integral para el desarrollo de la práctica y finalmente se presenta una primera versión del manual de práctica.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La educación en Ingeniería Civil enfrenta actualmente el desafío de formar profesionales capaces de comprender y aplicar de manera integral los conceptos del diseño estructural. Aunque los planes de estudio incluyen asignaturas teóricas sobre dinámica estructural y diseño sísmico, en la práctica los estudiantes rara vez tienen la oportunidad de observar el comportamiento real de las estructuras ante una excitación sísmica. Esto genera una brecha entre el conocimiento teórico adquirido en el aula y la comprensión física de los fenómenos estructurales.

El fenómeno de la torsión sísmica es uno de los más relevantes y a la vez difíciles de asimilar conceptualmente, pues implica el acoplamiento entre movimientos traslacionales y rotacionales de la estructura, originados por irregularidades en masa o rigidez. La complejidad matemática y geométrica de este fenómeno hace que su enseñanza requiera recursos visuales y experimentales que faciliten su entendimiento.

Por otro lado, la Facultad de Ingeniería de la UNAM cuenta con infraestructura experimental como la mesa vibradora del Laboratorio de Materiales que, aunque se ha utilizado con fines de investigación, presenta un gran potencial para incorporarse formalmente a las actividades docentes. Aprovechar este equipo en la formación universitaria representa una oportunidad para vincular la enseñanza teórica con la práctica experimental y fortalecer las competencias de los estudiantes en el análisis sísmico de estructuras.

Este trabajo se justifica en la necesidad de innovar las metodologías de enseñanza de la ingeniería estructural, integrando prácticas de laboratorio que favorezcan el aprendizaje activo, la observación directa y la validación empírica de conceptos teóricos. La práctica diseñada busca no solo ilustrar el fenómeno de torsión sísmica, sino también proporcionar a los estudiantes una experiencia cercana al proceso de investigación estructural: el diseño de modelos, la instrumentación, la adquisición y el análisis de datos.

OBJETIVOS Y ALCANCES

Diseñar y validar una metodología didáctica de carácter experimental-numérica para la enseñanza del fenómeno de torsión sísmica en edificios. Esto se realizará mediante el desarrollo, implementación y análisis exhaustivo de una práctica de laboratorio utilizando la mesa vibradora del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería UNAM.

La metodología integrará de manera sistémica la caracterización de modelos físicos a escala, su instrumentación y ensayo bajo excitaciones sísmicas, la modelación mediante elementos finitos y un análisis comparativo de los resultados. El fin último es ofrecer una herramienta pedagógica sólida, confiable y replicable que permita complementar y profundizar la formación académica de los estudiantes de Ingeniería Civil en el ámbito del diseño sismorresistente.

También se busca realizar una revisión crítica del estado del conocimiento en pedagogía aplicada a la ingeniería estructural, con especial énfasis en el diseño sismorresistente y el uso de diferentes métodos de enseñanza no tradicionales.

El alcance de esta investigación abarca el desarrollo integral de una metodología didáctica para el estudio experimental de la torsión sísmica en estructuras. Esto incluye el diseño, construcción y caracterización de modelos físicos a escala de edificios de tres niveles con asimetría controlada en rigidez, utilizando prototipos preexistentes desarrollados en trabajos previos. La metodología comprende la instrumentación y ensayo de estos modelos en la mesa vibradora uniaxial del Laboratorio de Materiales de la FI-UNAM, la determinación de sus propiedades dinámicas, y el desarrollo y calibración de modelos numéricos mediante software especializado de elementos finitos. El producto final será un manual técnico-metodológico completo que documente todo el proceso para su futura implementación educativa.

Si bien se validará la metodología mediante el análisis comparativo de resultados experimentales y numéricos, esta investigación no incluye la implementación pedagógica con estudiantes ni la evaluación de su impacto en el aprendizaje. Los modelos empleados son representaciones simplificadas a escala reducida, por lo que los resultados deben interpretarse en el contexto docente y no como una representación directa del comportamiento de estructuras reales ante sismos severos.

1. ASPECTOS PEDAGÓGICOS EN LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

En el panorama cambiante y desafiante que se presenta en la actualidad respecto a la educación superior en nuestro país y muy particularmente en nuestra Institución, la evolución de la pedagogía en la enseñanza de la ingeniería debe ser un tema presente en todos los agentes involucrados en el progreso de la formación universitaria. Es clave que innovemos en las metodologías y herramientas pedagógicas para que los estudiantes no solo sean técnicos capacitados, sino que puedan abordar de forma integral los desafíos sociales y de infraestructura que el país demanda.

El quehacer docente debe trascender su labor tradicional incorporando metodologías de trabajo activas y enfoques críticos impulsando un modelo educativo más integral y reflexivo, donde el alumnado pueda tener nuevas herramientas y diferentes perspectivas para incorporar los nuevos conocimientos recibidos y sea capaz también de generar nuevas técnicas y conocimientos.

Esta transformación es particularmente crítica en disciplinas de alto impacto social y económico, como en la ingeniería estructural, donde la calidad de la formación en la seguridad, resiliencia y sostenibilidad de la infraestructura nacional.

La problemática se hace más evidente al considerar el contexto de nuestro país, determinado por su alta sismicidad y la vulnerabilidad estructural históricamente demostrada en eventos como los sismos de 1985 y 2017. Como advierte Rodríguez (2019), la formación en ingeniería estructural en México debe responder a estas condiciones específicas mediante una profundización en el análisis sísmico, el diseño resiliente y el conocimiento profundo de las Normas Técnicas Complementarias, aspectos que no siempre reciben la atención suficiente en los programas académicos.

Además, la educación en ingeniería estructural enfrenta el desafío de formar profesionales que integren, junto con el dominio técnico, competencias transversales como el trabajo multidisciplinario, la comunicación efectiva y la responsabilidad ética (Gómez, 2021). Esta necesidad se ve obstaculizada por enfoques pedagógicos predominantemente tradicionales, con limitada vinculación con la industria y oportunidades de aprendizaje experiencial.

Dentro de los círculos de docencia, se habla constantemente de un significativo desfase entre los planes de estudio de muchas instituciones de educación superior y las competencias requeridas en el ejercicio profesional contemporáneo, pero de acuerdo con Quiróz (2007), “Los programas educativos se pueden modificar y los diseños curriculares pueden contener todos los requerimientos técnicos establecidos para el siglo XXI, pero lo que verdaderamente tiene efecto es lo que los profesores realizan con los alumnos en los espacios educativos.”

En este capítulo se busca presentar una visión general de los principales retos que actualmente enfrenta la enseñanza de la ingeniería estructural en México, analizando las principales características y diferenciadores entre la formación tradicional y los nuevos métodos de enseñanza, así como las implicaciones que estas herramientas

tienen para el futuro del desarrollo docente en nuestro entorno.

1.1. Enfoques pedagógicos en la enseñanza de la Ingeniería Civil

En nuestro país, la enseñanza de la Ingeniería Civil se desarrolla dentro de un escenario complejo, marcado por contradicciones entre la tradición académica y las exigencias de un entorno profesional en rápida transformación. De acuerdo con la Universidad de Antwerp (Van den Bergh et al., 2006), en la actualidad ser eficiente en la práctica profesional de la ingeniería implica ser capaz de operar en entornos indefinidos y altamente cambiantes, incluso sin herramientas y con recursos limitados, enfrentando ambientes sin rutinas ni protocolos claros. Es por ello que los estudiantes no solo deben adquirir conocimiento y habilidades propias de su carrera en específico, sino una serie de aptitudes relacionadas con otros ámbitos, como la administración, la gestión de personal y la interacción humana. Cualquier plan de estudios universitario debe estar desarrollado desde la idea de que se debe preparar a los estudiantes para un futuro altamente desconocido (Bowden y Marton, 1998).

Este cambio de paradigma implica una reevaluación crítica de los modelos pedagógicos predominantes en nuestra Facultad. Históricamente, y de manera generalizada en América Latina, el enfoque más utilizado ha sido el cognitivista, el cual se centra en los procesos mentales internos del estudiante durante el aprendizaje, como la memoria, la percepción y el razonamiento, procurando desarrollar habilidades de resolución de problemas (Aguirre, 2023). Uno de los métodos emblemáticos de este enfoque es la lección magistral, en la que un docente, de forma unidireccional y con poca interacción, transmite el marco teórico y los conceptos principales de su materia (Iglesias-Soilán, 2024). Se ha conceptualizado a la clase magistral universitaria como una actividad que es simultáneamente interacción y un tipo de discurso dialógico. Suele ser común durante los primeros semestres de las carreras de ingeniería, donde se suelen concentrar las materias de ciencias básicas, como Cálculo o Física; también es el enfoque principal en instituciones con recursos limitados o perspectivas educativas más rígidas o conservadoras, donde se prioriza la eficiencia en la medición de contenidos sobre el desarrollo de competencias prácticas (Gatica-Saavedra, 2021).

Sin embargo, la impartición exclusiva de este modelo tradicional presenta limitaciones fundamentales. La más significativa radica en su dificultad para fomentar la reflexión profunda, la búsqueda autónoma de información y una conexión efectiva entre la teoría y la práctica (Gatica-Saavedra, 2021). Esto sucede porque se posiciona al alumnado en un rol pasivo, como un receptor de información, se minimiza la interacción profesor-alumno y estudiante-estudiante, lo que dificulta que se desarrollen habilidades transversales esenciales, como el pensamiento crítico, o la resolución de problemas no estructurados. Tampoco suele fomentarse la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos. Como consecuencia, si bien los egresados suelen culminar sus estudios con una sólida base teórica, a menudo carecen de la capacidad para aplicar ese conocimiento de manera flexible y creativa en la realidad laboral, sintiéndose abrumados por las demandas de un proyecto de ingeniería real (Borrego et al., 2018). Además, este formato no alienta el desarrollo de "habilidades blandas", hoy reconocidas

como igual de importantes que el conocimiento técnico. La masificación de la educación superior en América Latina ha exacerbado estas limitaciones, ya que los grandes grupos de estudiantes dificultan aún más la implementación de metodologías que requieren seguimiento individualizado y retroalimentación constante (Lorente, 2019).

También se debe considerar que las necesidades de las grandes instituciones educativas han cambiado. El avance de la tecnología, su adaptación a la educación y el auge de la educación en línea y a distancia ha permitido que se adopten nuevos enfoques de enseñanza a la ingeniería. Hay una clara tendencia hacia la adopción de enfoques pedagógicos fundamentados en corrientes constructivistas, donde los estudiantes construyen nuevos conocimientos basados en experiencias, que es parte del aprendizaje activo.

En general se ha demostrado que se aumenta la retención y la comprensión de conceptos a través de la participación en clase. Así es como se introduce el aprendizaje centrado en el estudiante, que se consolida como un enfoque que empodera al alumno, transformándolo en el protagonista activo de su proceso formativo (Camjol, 2025) y en donde se han desarrollado varias metodologías. La que es más pertinente para nuestro estudio es el Aprendizaje basado en la experimentación que se conoce formalmente como Aprendizaje Basado en Proyectos y se ha visto impulsado por la acreditación y la necesidad de formar ingenieros que no solo sepan teoría, sino que puedan innovar, colaborar y resolver los problemas complejos del mundo real (Martí et al., 2010).

En el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) se desafía a los estudiantes a resolver problemas complejos y realistas, integrando conocimientos de diversas disciplinas y desarrollando habilidades prácticas de manera auténtica. Sus principales características incluyen un enfoque multidisciplinario, donde un solo proyecto puede abarcar conceptos de diferentes asignaturas, y un cambio en el rol del docente, quien pasa de ser un experto transmisor de conocimiento a un guía y orientador en el proceso de aprendizaje (Universidad Europea, 2023). El ABP también fomenta el uso de técnicas de evaluación alternativas a los exámenes convencionales, como portafolios, reportes de práctica, productos audiovisuales, proyectos de investigación, entre otros, que permiten valorar no solo la adquisición de conocimientos, sino también el proceso de aprendizaje, la calidad del producto final y la gestión de herramientas tecnológicas, el desempeño en equipo y el uso de conocimientos transversales o no directamente relacionados con la materia principal.

Complementariamente la educación dentro de la ingeniería se da en los laboratorios que apoyan al docente y al estudiante a materializar información, ya que proporcionan un espacio donde la teoría se valida a través de la experimentación controlada. En estos entornos, los estudiantes no solo refuerzan los conceptos abstractos, sino que desarrollan una comprensión profunda de los fenómenos físicos y las limitaciones prácticas de los modelos teóricos. Según Feisel y Rosa (2005), los laboratorios de ingeniería son esenciales para cultivar habilidades como la observación crítica, la medición precisa, el análisis de incertidumbre y la interpretación de datos, competencias que son difíciles de adquirir únicamente mediante la instrucción teórica.

En la realidad actual en la mayoría de las universidades públicas latinoamericanas no hay una elección entre lo tradicional y lo activo, sino la adaptación de un sistema híbrido. Esta mezcla resulta práctica, pues reconoce que el método tradicional sigue siendo útil para transmitir conocimientos teóricos de manera ordenada en materias con alta carga conceptual, al mismo tiempo que incorpora estrategias de enseñanza activa en los espacios donde es indispensable "aprender haciendo" (Zabalza-Beraza, 2020).

De este modo, el enfoque híbrido se presenta como la opción más viable para atender las distintas necesidades de los estudiantes: aprovecha lo mejor de la clase tradicional para la teoría, y complementa con métodos activos que desarrollan habilidades prácticas y de razonamiento.

1.2. Estado de la docencia actual y los retos que enfrenta

Es necesario hacer una reflexión profunda sobre las tensiones y contradicciones que enfrenta la Universidad en la actualidad y el futuro que se vislumbra.

En las últimas décadas, se ha consolidado en México y en casi toda América Latina un modelo de Universidad que prioriza la formación de "mano de obra calificada" (Brunner, 2009), midiendo el éxito y avance de las instituciones casi exclusivamente por la inserción laboral inmediata de los alumnos egresados.

Este modelo utilitarista responde principalmente a presiones del mercado y a la masificación del acceso a la educación superior en diferentes regiones del mundo. Este fenómeno ha ido desplazando paulatinamente la misión humanista y crítica de la universidad, centrada en la creación de conocimiento, el pensamiento complejo y la formación de profesionales analíticos con una visión multidisciplinaria (Barnett, 2017). Lamentablemente, en vez de cuestionar dicho cambio, existen posturas que enfatizan su deseabilidad, argumentando que significa que las universidades tienen hoy la opción de dejar de ser "torres de marfil" (Labraña y Brunner, 2023) para comprometerse con el desarrollo económico de sus respectivos países.

Sin embargo, este cambio hacia lo utilitario no opera por sí solo. Se ve potenciado y, en ocasiones es obstaculizado, por la estructura interna de las instituciones que a menudo parece funcionar de forma contraria a sus propios intereses. La rigidez curricular, denunciada por el profesorado, prolonga planes de estudio desactualizados que no logran responder ni a las demandas del mercado ni a los complejos desafíos globales (Imanol, 2018). Esta lentitud burocrática para renovar contenidos y metodologías genera una contradicción fundamental: se espera formar profesionales de vanguardia con herramientas del pasado y con poquísimos recursos, lo que impide que se cumpla la promesa de una formación relevante. Esta desconexión afecta especialmente la capacidad de las instituciones y los egresados para responder a las demandas sociales más urgentes.

Esta disfunción se profundiza con la carga burocrática que consume el tiempo y la energía del académico. La labor principal del docente se ve erosionada por una maraña de trámites, reportes y regulaciones (Ordorika, 2020). El resultado es un malestar profundo, donde el docente debe navegar un sistema que, en su búsqueda de control,

dificulta la misma innovación que dice promover. La universidad, en este sentido, se convierte en su peor enemigo, creando barreras internas que impiden alcanzar tanto la excelencia utilitaria como la crítica.

La paradoja se agudiza con los sistemas de evaluación. Mientras se proclama la importancia de la innovación y la investigación de alto impacto, los mecanismos como el PRIDE privilegian indicadores cuantitativos y productos inmediatos (Acosta-Silva, 2021). Esta incongruencia desincentiva proyectos a largo plazo y la enseñanza reflexiva, forzando al académico a elegir entre lo pedagógicamente valioso y necesario a lo burocrática o económicamente recompensado. Esta mercantilización del conocimiento amenaza con vaciar de contenido crítico y socialmente relevante la producción académica.

Esta situación se agrava por problemáticas estructurales en la planta laboral no académica. Con frecuencia, el personal de base administrativo y de apoyo, cuya función debería ser facilitar las labores académicas, responde a lógicas ajenas a la misión universitaria. Al estar protegido y alineado primordialmente con las directrices del sindicato y sus delegados, este sector opera con intereses no relacionados con el quehacer académico. Esto se traduce en una falta de capacitación, desinterés por las necesidades de la universidad y una resistencia activa a recibir instrucciones del personal académico o a brindar un apoyo eficiente en las actividades cotidianas. Esta fractura interna genera parálisis, entorpece iniciativas y crea un ambiente de frustración generalizada, donde las energías se diluyen en conflictos laborales, en lugar de concentrarse en la docencia, divulgación e investigación.

Ante estos complicados escenarios hay propuestas que apoyan a combatir la mercantilización de la educación. La idea del docente reflexivo (Schön, 1983), es una declaración de principios que busca rescatar lo esencial: el compromiso social del conocimiento. Al colocar al estudiante en el centro del proceso de descubrimiento, obligándole a contrastar la teoría con la evidencia física, se le restituye su rol de creador activo de conocimiento y se fortalece el vínculo universidad-sociedad.

Es necesario reivindicar la universidad como espacio de producción de conocimiento socialmente comprometido. En este contexto, la labor del docente y del estudiante en el laboratorio adquiere un significado más profundo. Cada experimento, cada pregunta crítica, se convierte en un pequeño acto de reivindicación de la universidad, una comunidad de aprendizaje donde el proceso de descubrir y cuestionar es, en sí mismo, el fundamento de su compromiso con la sociedad.

2. FUNDAMENTOS DEL FENÓMENO DE TORSIÓN EN EDIFICIOS

2.1. Aspectos generales del diseño sísmico de edificios

El diseño sismorresistente tiene como propósito garantizar que las edificaciones conserven su integridad estructural y funcional ante la acción de un sismo severo. Su objetivo no es eliminar los daños, sino controlar su magnitud para que no comprometan la estabilidad global de la estructura ni la vida de los ocupantes (CFE, 2020).

En México, las normas establecen que los edificios deben diseñarse considerando el nivel de desempeño esperado ante diferentes intensidades sísmicas. Este concepto, conocido como diseño por desempeño, implica que una estructura debe permanecer elásticamente resistente frente a sismos frecuentes y plásticamente dúctil frente a sismos excepcionales (Bazán & Meli, 1985).

El diseño por capacidad complementa este enfoque al establecer que los elementos estructurales deben jerarquizarse de manera que los componentes frágiles, como columnas o conexiones, no fallen antes que los elementos dúctiles, como vigas o muros de corte (CFE, 2020). De este modo, la energía sísmica se disipa controladamente en zonas previamente definidas, denominadas articulaciones plásticas.

Los edificios deben concebirse de forma regular tanto en planta como en elevación, evitando asimetrías en masa o rigidez, que generan acoplamientos en las vibraciones traslacionales y torsionales de una edificación y, por lo tanto, concentraciones de esfuerzos o desplazamientos en algunas partes de la estructura. Este tipo de irregularidad estructural es una de las principales causas de fallas por torsión, como se ha observado en diversos eventos sísmicos históricos (García, 2019).

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS-2023) establecen que los sistemas estructurales deben analizarse considerando las deformaciones laterales y torsionales que puedan ocurrir durante un movimiento sísmico, especialmente cuando existan irregularidades geométricas o de rigidez.

2.2. Aspectos básicos de la torsión sísmica de edificios

2.2.1. Descripción del fenómeno físico

Los sismos inducen fuerzas de inercia en los centros de masa CM de los niveles de los edificios, lo cual provoca que aparezcan fuerzas cortantes en los centros de cortante de los entrepisos (CC). La resistencia de los entrepisos se puede concentrar en lo que se conoce como centro de torsión del entrepiso (CTe) que también tiene un lugar correspondiente en el nivel (CTn).

Para los fines del análisis sísmico, el Centro de Torsión (CT) de un edificio se define como el lugar geométrico en sus niveles o entrepisos en el cual se debe aplicar la fuerza o cortante sísmico, para que exista solo traslación (García, 2025). La no coincidencia de

este punto con la del centro de cortante (en el entrepiso) o con el centro de masas (en el nivel) produce que un acoplamiento de vibraciones traslacionales y rotacionales del edificio.

Es necesario puntualizar que existe un CT en el nivel y uno en el entrepiso; al ser puntos distintos, debemos tener claro qué punto se está calculando para no confundir conceptos y obtener un cálculo erróneo. Lo mismo ocurre con el centro de masas (en el nivel) y el centro de cortante (en el entrepiso).

Haciendo el análisis en cada dirección, conocida la localización del CC y del CTe, se puede decir que los elementos verticales resistentes (columnas, muros) que se encuentran del mismo lado del centro de cortante respecto del centro de torsión se clasifican como flexibles, mientras que los elementos que están del otro lado se llaman rígidos. Es importante visualizar esto debido a que, en los elementos flexibles el momento torsional produce cortantes en la misma dirección que el cortante directo, lo que implica que el cortante por torsión se suma al cortante directo; mientras que, para los elementos rígidos el momento torsional produce cortantes adicionales en sentido opuesto a los cortantes directos, restándose al cortante directo (SMIE, 2019).

2.3. Cálculo de los lugares geométricos involucrados en el fenómeno de torsión.

2.3.1. Centros de torsión

Muchos autores tratan el tema de torsión sólo en planta, pero en realidad es un tema que se debería tratar de manera tridimensional. Existe una metodología matricial que permite realizar el cálculo de la localización del centro de torsión de edificios, el cual es aplicable solo si poseen diafragmas rígidos y planos verticales resistentes, sin importar la orientación en planta de estos (Alcocer, 1986).

Si el edificio posee diafragmas rígidos en los niveles, su comportamiento puede describirse mediante tres grados de libertad (u_i, v_i, θ_i) , Si se consideran deformaciones pequeñas, se puede asumir que la deformación lateral, D_{ij} , que sufrirá un marco cualquiera j orientado según el ángulo β_i , será, Figura 2.1:

$$D_{ij} = u_i \cos \beta_i + v_i \sin \beta_i + r_j \theta_i$$

Donde:

$$r_j = x_j \sin \beta_j - y_j \cos \beta_j$$

Siendo $A(x_j, y_j)$ un punto cualquiera sobre el eje del marco proyectado en la planta del edificio.

La deducción de la distancia r_j es puramente geométrica, Figura 2.2.

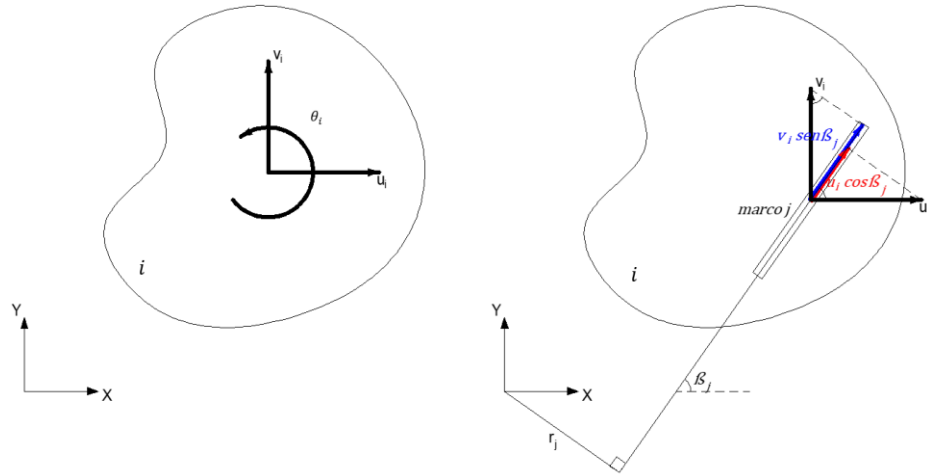


Figura 2.1 Diafragma i con sus grados de libertad y la proyección de estos en dirección del marco j para la configuración no deformada (Pérez-Pontón, 2020)

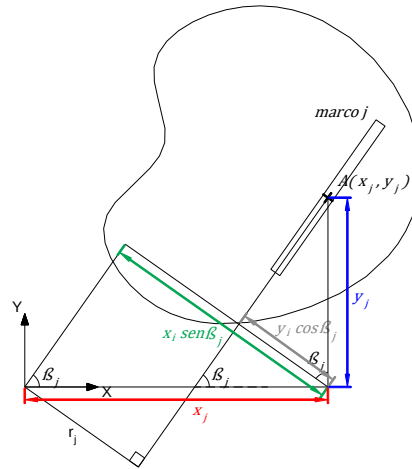


Figura 2.2 Deducción de r_j (Pérez-Pontón, 2020)

El método de rigideces establece que:

$$\{F\} = [K_G]\{d\}$$

Donde $\{d\}$ es el vector de desplazamientos en cada grado de libertad del edificio (3 por nivel), el vector $\{F\}$ contiene las fuerzas asociadas a cada grado de libertad y $[K_G]$ es la matriz de rigidez global de la estructura, es decir:

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XY} & K_{X\theta} \\ K_{YX} & K_{YY} & K_{Y\theta} \\ K_{\theta X} & K_{\theta Y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ \theta \end{bmatrix}$$

Donde:

$$[K_G] = \begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XY} & K_{X\theta} \\ K_{YX} & K_{YY} & K_{Y\theta} \\ K_{\theta X} & K_{\theta Y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma [K_{Dj}] \cos^2 \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] \cos \beta_j \sin \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] \cos \beta_j r_j \\ \Sigma [K_{Dj}] \sin \beta_j \cos \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] \sin^2 \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] \sin \beta_j r_j \\ \Sigma [K_{Dj}] r_j \cos \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] r_j \sin \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] r_j^2 \end{bmatrix}$$

En los elementos de esta matriz, K_{Dj} es la matriz de rigidez lateral del marco j y β_j es el ángulo que proporciona la orientación del marco en planta.

La metodología para el cálculo del centro de torsión se basa en su definición, con lo que se debe localizar el lugar geométrico en el que, si es aplicado el perfil de cargas laterales, solo se generarán desplazamientos en traslación.

Para encontrar las coordenadas X del centro de torsión de cada nivel, se debe eliminar la rotación de los diafragmas y aplicar la fuerza en dirección Y:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ F_Y \\ M_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XY} & K_{X\theta} \\ K_{YX} & K_{YY} & K_{Y\theta} \\ K_{\theta X} & K_{\theta Y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 0 \end{bmatrix}$$

Los desplazamientos u y v generados por la fuerza F_Y se pueden calcular a partir de las primeras dos ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ F_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XY} \\ K_{YX} & K_{YY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

Conocidos u y v , los momentos necesarios para que los diafragmas no roten son proporcionados por la tercera ecuación.

$$[M_0] = [K_{\theta X} \quad K_{\theta Y}] \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

Conocidos estos momentos, las coordenadas de los puntos del centro de torsión del nivel i se calculan dividiendo los valores de momento entre la fuerza del nivel:

$$X_{CTNi} = \frac{M_{0i}}{F_{yi}}$$

Con un planteamiento similar, eliminando la rotación de los diafragmas y aplicando las fuerzas en la dirección X, se pueden calcular las coordenadas Y del centro de torsión en cada nivel:

$$Y_{CTNi} = \frac{M_{0i}}{F_{xi}}$$

Las coordenadas del centro de torsión en el entrepiso se pueden obtener utilizando estática, aplicando las siguientes expresiones:

$$X_{CTE_i} = \frac{\sum_{k=i}^{NN} F_{Y_k} X_{CTN_k}}{V_{y_i}} \quad y \quad Y_{CTE_i} = \frac{\sum_{k=i}^{NN} F_{X_k} Y_{CTN_k}}{V_{X_i}}$$

Con base en este procedimiento es posible utilizar programas comerciales de análisis estructural para determinar la localización del centro de torsión de un edificio. Para ello se realiza el análisis en cada dirección del edificio, impidiendo la torsión del edificio y obteniendo las coordenadas del centro de torsión de cada entrepiso dividiendo el momento total que se produce en el entrepiso entre la fuerza cortante correspondiente. Para pasar al nivel se emplea la estática.

2.3.2. Centro de masa y de cortante

Las coordenadas de los centros de masa del nivel “i” se pueden determinar por estática, obteniendo el primer momento de área de las “j” masas que conforman el nivel respecto a cada eje de cálculo y dividiendo estos resultados entre la masa total del nivel.

$$X_{CM_i} = \frac{\sum_{j=1}^{NM} M_j X_j}{\sum_{j=1}^{NM} M_j} \quad y \quad Y_{CM_i} = \frac{\sum_{j=1}^{NM} M_j Y_j}{\sum_{j=1}^{NM} M_j}$$

Las coordenadas del centro de cortante se pueden calcular conociendo la posición de los centros de masa de los niveles superiores y las fuerzas aplicadas en cada uno de ellos, las cuales generan la fuerza cortante en el entrepiso de interés. Con base en esto:

$$X_{CC_i} = \frac{\sum_{k=i}^{NN} F_{Y_k} X_{CM_k}}{V_{y_i}} \quad y \quad Y_{CC_i} = \frac{\sum_{k=i}^{NN} F_{X_k} Y_{CM_k}}{V_{X_i}}$$

2.4. Aspectos normativos

La Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo del 2023 (NTC-DS-2023) establece en el punto 2.3 “Efectos de torsión” lo siguiente, en donde se puede observar que, aún en las normas existe confusión entre la evaluación de la excentricidad estructural en el nivel y en el entrepiso.

La excentricidad torsional, e_s , calculada en cada entrepiso, debe tomarse como la distancia entre el centro de torsión del nivel correspondiente y la línea de acción de la fuerza lateral que actúa en él. Para fines de diseño, el momento torsionante debe tomarse, por lo menos, igual a la fuerza lateral que actúa en el nivel multiplicada por la excentricidad que para cada elemento vertical sismorresistente resulte más desfavorable de las siguientes:

$$1.5e_s + e_a$$

$$e_s - e_a$$

donde e_a es la excentricidad accidental en la dirección de análisis, medida perpendicularmente a la acción sísmica.

La excentricidad accidental, e_{ai} , en la dirección perpendicular a la de análisis en el i-ésimo entrepiso debe calcularse como sigue:

$$e_{ai} = \left[0.05 + 0.05 \left(\frac{i-1}{n-1} \right) \right] b_i$$

donde b_i es la dimensión del i-ésimo piso en la dirección perpendicular a la dirección de análisis; y n , el número de pisos del sistema estructural. Cuando las fuerzas sísmicas se aplican de manera concurrente en 2 direcciones ortogonales, la excentricidad accidental no necesita ser considerada de manera simultánea en ambas direcciones, sino que debe ser aplicada en la dirección que produce el mayor efecto.

Cuando el sistema estructural cuente con diafragmas de piso rígidos, el efecto de la torsión accidental puede ser considerado añadiendo a las fuerzas y desplazamientos que resulten de un análisis que no la considere, los efectos de un sistema de cargas que produzca un momento alojado en el plano de cada nivel de piso. El valor de cada uno de estos sistemas de carga se determinará de manera que produzca los momentos torsionantes de entrepiso que resultarían de considerar en cada dirección horizontal ortogonal la fuerza cortante de entrepiso multiplicada por la excentricidad accidental calculada con la ecuación correspondiente. Para este fin, se considerarán dos configuraciones de los momentos torsionantes debidos a las excentricidades accidentales, una en que todos los momentos adicionales se tomen con signo positivo y otra con signo negativo. Esta condición se cumple de acuerdo con lo siguiente:

$$M_{0i} = \pm (M_{ai} - M_{a(i+1)})$$

Donde M_{0i} es el momento aplicado en el plano del i-ésimo nivel, y $M_{ai} = (V_i \times e_{ai})$, en donde V_i es la fuerza cortante del i-ésimo entrepiso en la dirección del análisis, y e_{ai} su correspondiente excentricidad accidental de entrepiso, calculada de acuerdo con la ecuación 16.

Ningún elemento estructural podrá tener una resistencia menor que la necesaria para resistir la fuerza cortante que le corresponda sin tomar en cuenta la torsión accidental.

3. LA EXPERIMENTACIÓN EN MESA VIBRADORA COMO HERRAMIENTA DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

La ingeniería sísmica es una disciplina de suma importancia en México debido a la alta sismicidad del país que representa una amenaza constante para la población, la infraestructura y la economía nacional, haciendo indispensable el desarrollo y la aplicación continua de conocimientos especializados en esta área (Pérez, 2018; Rodríguez & Martínez, 2018). México ha sido pionero en la instrumentación sísmica de estructuras, con la implementación de la Red Acelerográfica del Valle de México y otros sistemas que registran el comportamiento real de los edificios durante los sismos (Pérez, 2018).

Estos avances en la disciplina se han podido realizar gracias a la observación de eventos reales, el desarrollo de modelos teóricos y numéricos, y la experimentación física. Dentro de esta última, la mesa vibradora es una herramienta muy versátil que nos ayuda a simular los efectos de un sismo sobre modelos de estructuras. Su evolución histórica está ligada al deseo de comprender cómo impactan los eventos sísmicos en las estructuras y cómo se puede mitigar en ellas la devastación causada por los mismos.

Los orígenes de las mesas vibradoras se remontan a finales del siglo XIX y principios del XX. Uno de los primeros dispositivos registrados fue desarrollado en Japón por Fusakichi Omori quien es famoso por descubrir cómo disminuyen las réplicas de un sismo con el tiempo. Esta observación se conoce hoy como la «Ley de Omori» (Kiddle, 2025). Después del terremoto de Nobi en 1891, Omori trabajó con John Milne para investigar cómo los edificios de mampostería y otras estructuras se comportan durante los terremotos creando un dispositivo rudimentario, del que no hay descripciones físicas detalladas, pero se sabe que estaba formado por un vagón sobre rieles conectado a una rueda por una manivela excéntrica con la que se generaba el movimiento, posteriormente el accionamiento manual fue sustituido por el uso de motores eléctricos y el movimiento era unidireccional. Con este dispositivo comparó los resultados de estos experimentos con lo que ocurría en terremotos reales marcando el inicio del uso de pruebas experimentales en laboratorio para estudiar el comportamiento de estructuras y materiales bajo cargas dinámicas que imitaban sismos reales. También se han utilizado en el estudio de la licuación de suelos (Peralta, 2023).

Es hasta la segunda mitad del siglo XX, con el avance de la electrónica y los sistemas de control hidráulico, que las mesas vibradoras experimentaron su mayor desarrollo. La necesidad de diseñar estructuras capaces de resistir eventos sísmicos catastróficos, impulsó la inversión en instalaciones y prototipos de investigación a mayor escala. Inicialmente, estas mesas eran de un solo grado de libertad, pero por la complejidad de los movimientos sísmicos, poco a poco se llegó al desarrollo de mesas con dos y tres grados de libertad. Hoy en día, las instalaciones más avanzadas, como la de la Red de Ingeniería Sísmica Experimental (NEES) en Estados Unidos o la instalación E-Defense en Japón, cuentan con mesas de seis grados de libertad, capaces de reproducir movimientos en tres traslaciones y tres rotaciones, con capacidades de soportar modelos de estructuras a escala real (Taucer & Pinto, 2016).



Figura 3.1 Prueba de un modelo a escala de un edificio de oficinas de 10 pisos en una mesa vibradora tridimensional, registrando datos mediante sensores en sus pilares y muros. Fuente: Centro de Ingeniería Sísmica de Hyogo.

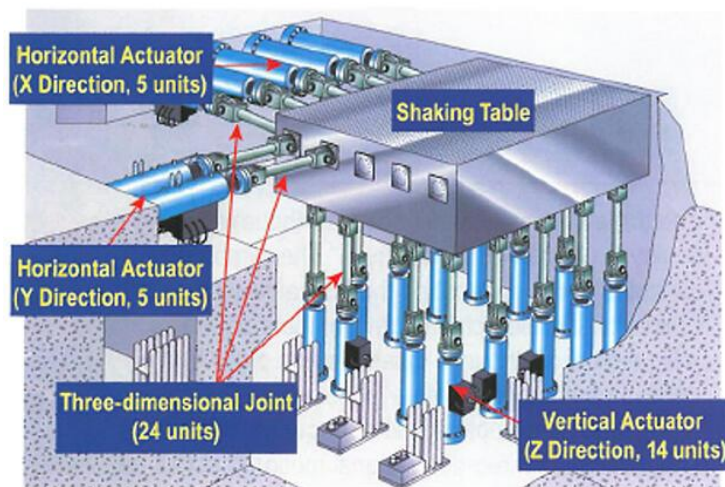


Figura 3.2 Estructura de la mesa vibradora. La mesa puede moverse ± 1 m en dirección horizontal y ± 50 cm en dirección vertical. Fuente: Centro de Ingeniería Sísmica de Hyogo.

En el contexto de la enseñanza, las mesas vibradoras también han tenido avances. Si bien las mesas de investigación son grandes, costosas y de control complejo, el abaratamiento de componentes como actuadores, sensores y sistemas de adquisición de datos ha permitido la creación de mesas vibradoras didácticas de menor costo. Estas mesas, a menudo controladas por software de código abierto y construidas con materiales accesibles, han permitido un mayor acceso a la experimentación sísmica. Para un estudiante de ingeniería civil, ver colapsar un modelo a escala en una mesa vibradora bajo una aceleración específica tiene un impacto pedagógico incomparable pues transforma ecuaciones diferenciales abstractas en un fenómeno físico tangible y memorable (Sánchez et al., 2020).

Por lo tanto, la mesa vibradora funciona como un puente indispensable entre la teoría

y la práctica. En investigación, ayuda a validar y calibrar modelos computacionales complejos, permitiendo refinar los códigos de diseño sísmico. En la enseñanza, simplifica el comportamiento dinámico de las estructuras y fomenta un aprendizaje activo basado en la indagación y la experiencia directa.

3.1. Beneficios de la experimentación con mesa vibradora en la comprensión de fenómenos estructurales

La experimentación en mesa vibradora ofrece una serie de beneficios que la convierten en una herramienta versátil para el estudio del comportamiento estructural frente a acciones dinámicas. Con ella es posible observar y analizar cómo las estructuras responden ante excitaciones sísmicas, lo cual proporciona una comprensión más profunda de los principios de la dinámica estructural y de las variables que influyen en su desempeño.

Uno de los usos principales de la mesa es para la validación de modelos teóricos y numéricos. Los programas de análisis estructural, aunque son precisos, se basan en simplificaciones que deben contrastarse con resultados experimentales. La mesa vibradora permite aplicar en modelos físicos de propiedades conocidas, señales o registros sísmicos reales o sintéticos. Los datos obtenidos como aceleraciones, desplazamientos y deformaciones se comparan con los obtenidos mediante simulaciones, lo que permite ajustar los modelos y afinar los supuestos de cálculo (Málaga-Chuquitaype, 2017).

Otro beneficio fundamental es la posibilidad de observar directamente el comportamiento dinámico de las estructuras y los mecanismos de falla que se desarrollan bajo cargas dinámicas. Este tipo de observación resulta invaluable para identificar cómo se distribuyen los esfuerzos, cómo se degradan los materiales y en qué zonas se concentran las deformaciones. La experimentación permite ver de forma tangible fenómenos que en el análisis numérico solo se deducen, como la formación de grietas, pandeos locales o colapsos progresivos de modelos estructurales.

Igualmente, la mesa vibradora permite explorar fenómenos dinámicos complejos y estudiar de manera controlada variables como la distribución de masa y rigidez, el amortiguamiento o la interacción suelo-estructura. A partir de modelos a escala, es posible analizar la influencia de cada uno de estos factores y comprobar las predicciones teóricas mediante resultados medibles. Aunque los efectos de escala representan un reto, por la determinación de las leyes de similitud, pues aunque las leyes son aplicables en cualquier modelo, muchas veces obligan a reproducir materiales o condiciones que no son factibles físicamente, pero es la única manera en la ingeniería experimental que permita extrapolar los resultados de modelos reducidos al comportamiento de estructuras reales (Ibrahim, 2017).

Por otra parte, la experimentación física es clave para la evaluación y desarrollo de tecnologías de protección sísmica, como amortiguadores, aisladores de base o sistemas de disipación de energía. Probar estos dispositivos en condiciones de laboratorio controladas permite tener información esencial antes de su aplicación en edificaciones

reales, lo que permite probar aditamentos o modelos innovadores que apoyen a la investigación.

En el ámbito educativo, las pruebas en mesa vibradora fomentan una comprensión intuitiva de los conceptos de dinámica estructural. Los estudiantes no solo observan cómo una estructura responde ante diferentes tipos de excitación, sino que también desarrollan habilidades de instrumentación, medición, análisis de datos y comunicación técnica. Esta aproximación experimental complementa el aprendizaje teórico, promueve la curiosidad científica y añade conocimientos importantes para los futuros ingenieros para interpretar y resolver problemas estructurales reales.

En conjunto, la mesa vibradora constituye una plataforma de experimentación que impulsa el avance del conocimiento estructural, la mejora de los diseños sísmicos y la formación integral de los ingenieros civiles con herramientas actuales.

3.2. Aplicaciones en la enseñanza de la ingeniería civil

La incorporación de mesas vibradoras en la enseñanza de la ingeniería civil representa una transformación pedagógica hacia un aprendizaje activo y experiencial. Su aplicación va más allá de una simple demostración visual y se integra en el desarrollo de competencias profesionales fundamentales.

Una de las aplicaciones más directas es la ilustración de conceptos de dinámica estructural. Conceptos como frecuencia natural, amortiguamiento, modos de vibración y resonancia se vuelven intuitivos cuando los estudiantes construyen un modelo simple (por ejemplo, un sistema de un grado de libertad con diferentes alturas o masas) y observan su respuesta ante distintos tipos de excitación (armónica, sinusoidal o a partir de un registro sísmico real). Este tipo de experiencias convierten el aprendizaje abstracto en comprensión física concreta.

En segundo lugar, la mesa vibradora es una herramienta poderosa para fomentar la metodología científica y el trabajo colaborativo. Se pueden diseñar prácticas de laboratorio donde los estudiantes formulen hipótesis, elaboren sus modelos estructurales, los instrumenten con sensores (acelerómetros, galgas o LVDTs), realicen los ensayos, registren y analicen los datos, y finalmente discutan los resultados. Este proceso reproduce el quehacer profesional del ingeniero estructurista o investigador, fortaleciendo habilidades como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la comunicación técnica (Smyrou et al., 2021).

Otra aplicación relevante es la validación práctica de diseños sísmicos y criterios normativos. Los estudiantes o investigadores pueden diseñar un modelo de acuerdo con los lineamientos de la normativa vigente y someterlo a diferentes niveles de excitación. Esto les permite verificar si su diseño cumple con los objetivos de desempeño estructural, como evitar el colapso o limitar el daño, y comprender el fundamento detrás de las disposiciones normativas, con las que trabajarán en el ámbito profesional.

Finalmente, el uso de mesas vibratoras de bajo costo o didácticas, muchas veces construidas por los propios alumnos, en proyectos que combinan impresión 3D, electrónica básica y control por microprocesadores (como Arduino o Raspberry Pi) promueven la interdisciplinariedad y la creatividad técnica. Estas experiencias preparan a los futuros ingenieros para entornos profesionales en los que se relacionarán con conceptos de otras disciplinas, que también deberán conocer.

3.3. La mesa vibradora del laboratorio de materiales. Funcionamiento básico y especificaciones técnicas

La mesa vibradora del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM es un equipo servohidráulico de un grado de libertad, diseñado para reproducir de manera controlada movimientos horizontales similares a los producidos por un sismo. Este instrumento constituye una herramienta esencial tanto para la investigación experimental en ingeniería sísmica como para la enseñanza práctica del comportamiento dinámico de estructuras a escala reducida (Pérez Pontón, 2020).

El sistema fue adquirido con el patrocinio de la Sociedad de Exalumnos de la Facultad de Ingeniería (SEFI) y el apoyo técnico de la empresa Flopac S.A. de C.V., responsable del diseño, fabricación y ensamble del equipo de control. Su estructura principal está compuesta por una plataforma móvil de 2×2 m, construida en perfil estructural de aluminio, que se desplaza sobre guías lineales mediante un actuador hidráulico de doble efecto. La mesa tiene una carrera máxima de aproximadamente 20 cm, permitiendo movimientos de ± 10 cm. La carga máxima que puede soportar es de 250 kg, y su rango operativo de frecuencia va de 0.2 a 10 Hz (Flopac S.A. de C.V., 2019).

Para iniciar un nuevo ensayo en la mesa se inicia con la revisión de la integridad del equipo. Se verifica que las conexiones y mangueras del sistema hidráulico se encuentren en buenas condiciones. Se verifica que las correderas que soportan la platina estén aceitadas.

En cuanto a los parámetros del sistema de control de la mesa y de los acelerómetros, el programa para el manejo de la mesa vibradora cuenta con 4 pestañas principales: Ensayo, Edición, Manual y Parámetros. fig. 11.

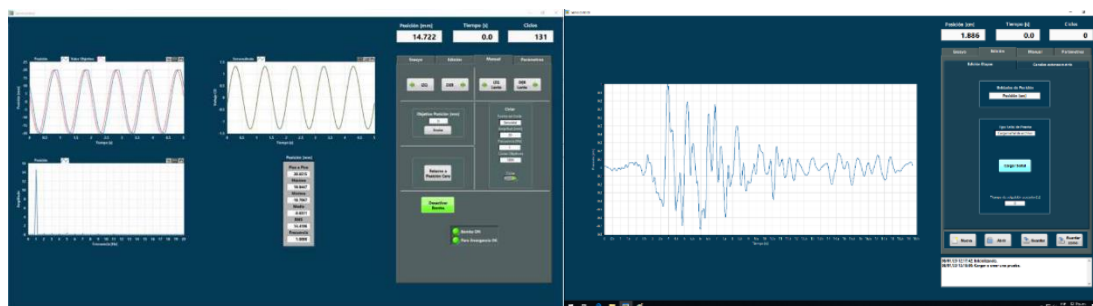
En la pestaña “Manual”. Permite el encendido/apagado de la unidad de potencia hidráulica, el posicionamiento manual de la mesa y la generación de señales senoidales con amplitud y frecuencia definidas por el usuario.

Pestaña “Edición”. Facilita la configuración de los ensayos. En este módulo se define el desplazograma de entrada, ya sea como una función senoidal o mediante un archivo de texto proporcionado por el usuario (útil las asociadas a registros sísmicos reales. Además, en esta sección se configura el proceso de adquisición de datos, seleccionando el tipo de transductor, las unidades de medida y las constantes de calibración correspondientes para cada canal.

Pestaña Ensayo: Permite ejecutar, pausar o cancelar un ensayo a partir de una configuración predefinida en la pestaña Edición. Su interfaz gráfica muestra

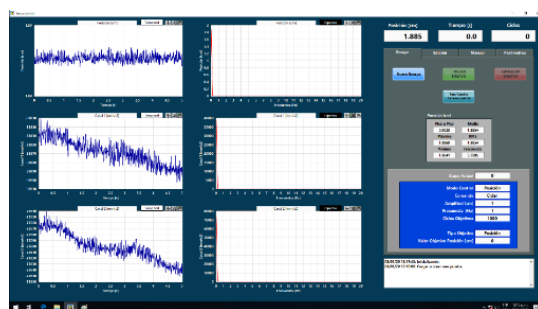
simultáneamente hasta seis gráficos: uno para supervisar la posición objetivo versus la posición real de la mesa, y los cinco restantes para visualizar las señales de los canales configurados, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia (espectro de Fourier). La visualización espectral es particularmente útil para identificar rápidamente las frecuencias naturales dominantes de los modelos físicos en estudio.

Pestaña Parámetros: permite calibrar el transductor de desplazamientos con el que se controla la posición de la mesa, accediendo como administrador (Pérez-Pontón, 2020).



a) Manual

b) Edición



c) Ensayo

Figura 3. 3 Ventanas más empleadas del software de control de la mesa vibradora

Antes de cargar cualquier señal a la mesa es necesario realizar un proceso de calentamiento del sistema hidráulico para llevar el aceite a su temperatura óptima de operación y garantizar que el fluido alcance la viscosidad adecuada para una respuesta eficiente del actuador. Este proceso se realiza induciendo a la mesa vibradora una señal senoidal de baja frecuencia (aproximadamente 0.5 Hz), con una amplitud del orden del 80% de la carrera máxima, trabajando durante el periodo de tiempo (aproximadamente 5min) que permita que el termómetro de la unidad de potencia hidráulica alcance las condiciones de operación estables.

4. METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

4.1. Definición de objetivos de aprendizaje y pertinencia de la implementación práctica

El objetivo central de aprendizaje de la práctica es que los estudiantes logren visualizar el fenómeno de torsión sísmica en un modelo físico ensayado en mesa vibradora y mostrar su respuesta ante la acción de un registro sísmico real. El entendimiento de este fenómeno sienta las bases para el entendimiento claro de los aspectos normativos que están relacionados con la regularidad estructural.

Igualmente se espera que los alumnos observen conceptos como la obtención de modos de vibrar (periodos y formas modales) y la disminución de la respuesta estructural debida a los mecanismos de disipación de energía (amortiguamiento).

Una de las nociones que se busca enseñar a los estudiantes es la instrumentación de edificaciones. Esta técnica se emplea para medir las propiedades dinámicas de las estructuras o su respuesta bajo vibración libre o forzada, con el objetivo de evaluar su salud estructural. Si bien los sensores utilizados en una mesa vibradora no son los mismos que se usan en campo, la técnica de instrumentación, medición simultánea y procesamiento de la información sí son aplicables. Esto toma relevancia debido a qué es una metodología que es utilizada en el campo profesional para el monitoreo de las edificaciones.

Sobre la pertinencia de la implementación práctica, de acuerdo con el plan de estudios vigente (2023) de la Licenciatura en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Figura 4.1, los estudiantes deben cursar de manera obligatoria la asignatura de Diseño Estructural en el noveno semestre. Ésta es una materia integradora, pues representa un puente entre los conceptos básicos aprendidos en la seriación precedente y permiten la cohesión con los principios de la ingeniería sísmica en su primer contacto formal, Figura 4.2.

Resulta fundamental que los estudiantes de ingeniería civil no solo comprendan teóricamente el comportamiento dinámico de las estructuras ante acciones sísmicas, sino que también desarrollen una percepción realista de sus efectos. Si bien los programas computacionales (como ETABS o SAP2000) son herramientas valiosas para el análisis y diseño, estos representan el fenómeno sísmico mediante modelos numéricos simplificados que pueden distanciar al alumno de la realidad física del problema. En un país altamente sísmico como México, es crucial que los futuros ingenieros estructurales internalicen cómo responden los edificios ante excitaciones dinámicas, comprendan las limitaciones de los modelos computacionales, y se sensibilicen ante las consecuencias reales de un diseño inadecuado.

METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA



Figura 4.1 Plan de estudios de la carrera en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.
 Fuente: www.ingenieria.unam.mx/programas_academicos/licenciatura/civil_plan

2 Acciones sobre estructuras

Objetivo: El alumno comprenderá los orígenes y características de las solicitaciones dinámicas como sismo y viento para determinar sus efectos sobre las estructuras.

Contenido:

- 2.1 Aspectos generales de reglamentación.
- 2.2 Solicitaciones sísmicas y características de los sismos.
- 2.3 Estructuras amortiguadas de varios grados de libertad. Modos de vibración. Factores de participación. Efectos del amortiguamiento estructural. Respuesta dinámica elástica. Espectros de respuesta elásticos e inelásticos. Espectros de diseño.
- 2.4 Determinación de efectos sísmicos en diferentes formas estructurales por criterios estáticos. Ductilidad de estructuras usuales. Fuerzas y desplazamientos **Efectos de torsión**. Distribución a los elementos resistentes.
- 2.5 Viento. Origen y características, factores que influyen en la intensidad de las presiones, principio de Bernoulli. Tipificación de estructuras en función de su respuesta ante las solicitaciones de viento. Régimen laminar y turbulento, velocidad crítica, vibraciones, vorticidad, vibraciones causadas por vórtices transversales al flujo (vórtices de Von Karman).
- 2.6 Obtención de fuerzas por viento para estructuras de baja y alta respuesta dinámica. Respuestas estructurales, presiones pseudoestáticas.
- 2.7 Otras acciones: cargas vehiculares en puentes carreteros y de ferrocarriles. Empujes estáticos y dinámicos de líquidos yseudolíquidos. Movimientos y deformaciones de carácter dinámico. Asentamientos diferenciales diferidos y súbitos.

Figura 4.2 Subtemas de la asignatura Diseño Estructural relacionadas con al caso de estudio en el Plan de estudios de la carrera en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Fuente: https://www.ingenieria.unam.mx/programas_academicos/licenciatura/Civil/2023/asignaturas_civil_2023.pdf

4.2. Rol de la institución, estudiante y docente en la facilitación de la práctica

Para lograr un aprendizaje integral y significativo, la implementación efectiva de una práctica de laboratorio no solo requiere un buen diseño técnico y pedagógico, sino también una definición clara de los roles y responsabilidades de los actores clave: la institución, el docente y el estudiante.

La Facultad de Ingeniería de la UNAM al ser la Institución pública más reconocida del país tiene la obligación de mantenerse a la vanguardia en herramientas educativas que contextualicen al alumno y le ofrezcan herramientas de aprendizaje más allá del aula.

De acuerdo con la misión de la Facultad, plasmada en el Plan de Desarrollo 2023-2027, la institución tiene como uno de sus objetivos primordiales “Formar profesionales en ingeniería con conocimientos de vanguardia académica”. Para materializar esta visión, la Facultad asume un rol proactivo en la facilitación de la práctica, el cual se manifiesta en los siguientes puntos:

Infraestructura especializada: Garantiza la disponibilidad de laboratorios equipados con tecnología avanzada, como la mesa vibradora y el instrumental de medición, que hacen posible la experimentación física. Del mismo modo, asegura el acceso a software comercial de diseño estructural (como ETABS) para la validación de modelos

numéricos, un componente central de esta práctica.

Fomento de metodologías activas: Promueve un modelo pedagógico que se aleja de la exposición teórica pasiva. Esto incluye el fomento del aprendizaje basado en proyectos y la confrontación de los estudiantes con problemas reales de la ingeniería, como el que se aborda en esta propuesta de laboratorio.

Actualización docente: Brinda programas de capacitación continua para los profesores, manteniéndolos actualizados tanto en las últimas normativas técnicas como en las mejores prácticas didácticas para la enseñanza de la ingeniería. Esto asegura que el facilitador de la práctica posea los conocimientos y las habilidades pedagógicas para guiar eficazmente a los estudiantes.

El estudiante es el eje central de este modelo pedagógico. Si bien su rol en la fase de experimentación física es primordialmente de observación, esta es crucial para la comprensión de los conceptos. La confrontación visual del fenómeno de torsión sísmica en los modelos físicos es vital para sensibilizar al alumno sobre los principios teóricos y el comportamiento estructural.

La participación fundamental y más activa del estudiante se desarrolla en la fase de modelación numérica. En este punto, se le exige una implicación activa para recrear los resultados experimentales en un modelo numérico desarrollado en software comercial. A través de este proceso, el estudiante no solo adquiere conocimientos, sino que también desarrolla competencias técnicas y de razonamiento crítico al calibrar el modelo, analizar los datos y contrastar las predicciones del software con las observaciones reales. Esta confrontación directa empodera al estudiante, lo sensibiliza sobre la respuesta dinámica real de las estructuras y subraya la importancia de la validación experimental, elementos cruciales para su futuro ejercicio profesional.

4.3. Descripción de la metodología

La metodología experimental se estructura en seis etapas de aplicación flexible (Pérez-Pontón, 2025):

1. Diseño y construcción del modelo estructural físico. Se elabora un modelo estructural físico representativo de un edificio para mostrar el fenómeno de interés, considerando su funcionalidad didáctica y los recursos disponibles. Este diseño suele basarse en un modelo numérico preliminar.
2. Caracterización de los materiales. Se determinan las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el modelo, para que sus parámetros sean conocidos y consistentes.
3. Desarrollo del modelo numérico con base en las características del modelo físico.
4. Protocolo experimental, que incluye:
 - Revisión del estado del equipo y definición de parámetros del sistema de control para la operación de la mesa vibradora.

- Verificación de la correcta operación de sensores y canales de comunicación.
 - Diseño de los arreglos de sensores con base en el comportamiento o fenómeno a estudiar.
 - Adquisición y procesamiento de los datos.
 - Determinación experimental de las propiedades dinámicas del modelo físico
 - Calibración del modelo analítico con base en resultados experimentales
 - Selección de la excitación sísmica.
 - Verificación de la congruencia entre las señales de entrada y salida de la mesa vibradora.
5. Ensayo dinámico: para la obtención de la respuesta estructural con base en los objetivos del experimento. Se realizan los ensayos en la mesa vibradora bajo las excitaciones dinámicas planificadas, registrando la respuesta estructural.
 6. Análisis comparativo de las respuestas teóricas y experimentales. Se contrastan de forma cualitativa y cuantitativa los resultados experimentales con los obtenidos del modelo numérico, validando así la representatividad de este último.

4.4. Fase 1: Diseño y construcción del modelo estructural físico.

En el diseño de los modelos físicos es crucial seleccionar una configuración geométrica y materiales que permitan visualizar claramente el fenómeno físico de interés, en éste caso, el fenómeno de torsión sísmica elástica de edificios. Para poder hacer la comparación del comportamiento se realizó un modelo de referencia y tres modelos asimétricos en rigidez.

4.4.1. Modelo de referencia (M0)

Este modelo es representativo de un edificio simétrico de tres niveles, el cual está estructurado con columnas y losa plana, conectadas entre sí con un sistema de conexiones impresas en 3D; tiene dimensiones en planta de 40 x 30 cm y alturas de entrepiso de 30 cm, Figura 4.3. En dirección longitudinal cuentan con dos crujías con ancho de 15 cm y una crujía en dirección transversal de 20 cm. Las losas están fabricadas en acrílico con espesor de 0.6 cm y las columnas son de policarbonato sólido (LEXAN) con sección transversal cuadrada constante de 0.6 cm por lado.

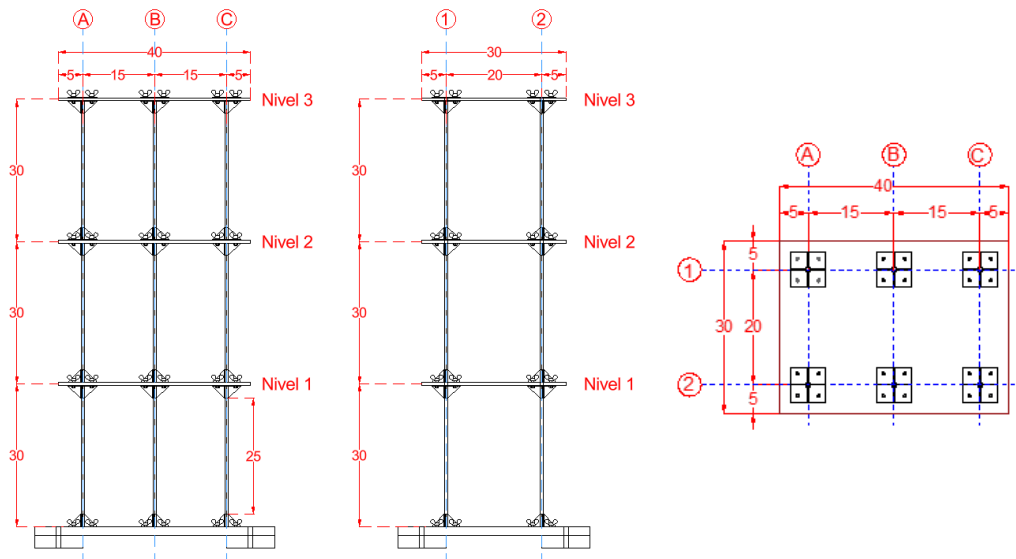


Figura 4.3 Características geométricas generales de ambos modelos

Con el fin de que el edificio tuviese la suficientemente flexibilidad, su configuración geométrica contempló alturas de entrepiso mayores a las de la escala del edificio y el material de fabricación de las columnas (policarbonato sólido) tuvo la suficiente flexibilidad y resistencia como para que las configuraciones deformadas del edificio fueran claramente visibles manteniendo a los materiales en comportamiento elástico-lineal.

Para las conexiones columna – losa se exploraron diversas alternativas obteniendo buenos resultados con el uso de conexiones atornilladas impresas en 3D con ácido poliláctico (PLA), Figura 4.4, que resultaron ser una solución versátil pues permiten realizar un diseño propio, que se puede adaptar a diferentes modelos, se puede imprimir en diversos materiales y geometrías para simular diferentes rigideces. Respecto al método de sujeción se prefirieron conexiones atornillables, pero los elementos impresos en 3D podrían representar una alternativa para adecuarse a casi cualquier tipo de elementos.



Figura 4.4 Conexiones impresas en 3D

La calidad de fabricación es esencial para minimizar desviaciones en la respuesta estructural; herramientas como el corte por láser y el router nos aseguraron la precisión dimensional de los elementos.

Para garantizar la correcta transmisión del movimiento de la mesa vibradora al modelo físico y evitar posibles deslizamientos, se debe construir una base de conexión modelo-platina (placa base) que permita la correcta fijación del modelo a la mesa vibradora. En los modelos desarrollados para este trabajo, se fabricaron placas base de madera con asas que permiten su manipulación y transporte. La fijación a la mesa se realizó con tornillos insertados en orificios en la base, los cuales se acoplan directamente a las ranuras de la platina de la mesa vibradora, Figura 4.5. En el diseño de esta placa se aseguró que su rigidez sea suficiente para evitar rotaciones inducidas por momentos de volteo durante la excitación de la mesa, las cuales podrían modificar la respuesta dinámica obtenida.



Figura 4.5. Base del modelo

Es importante mencionar que se realizaron modelaciones numéricas preliminares para predecir el comportamiento del modelo y validar su conveniencia antes de la construcción.

4.4.2. Modelos asimétricos en rigidez (M1, M2 y M3)

En un modelo gemelo se realizaron tres variaciones con asimetría en rigidez (modelos M1, M2 y M3) con columnas más robustas, de transversales de 0.9 cm por lado, colocadas en el eje A, Figura 4.6, en tres configuraciones: 1) en todos los entrepisos, 2) en el primero y segundo entrepisos y 3) en el primer entrepiso, Figura 4.7.

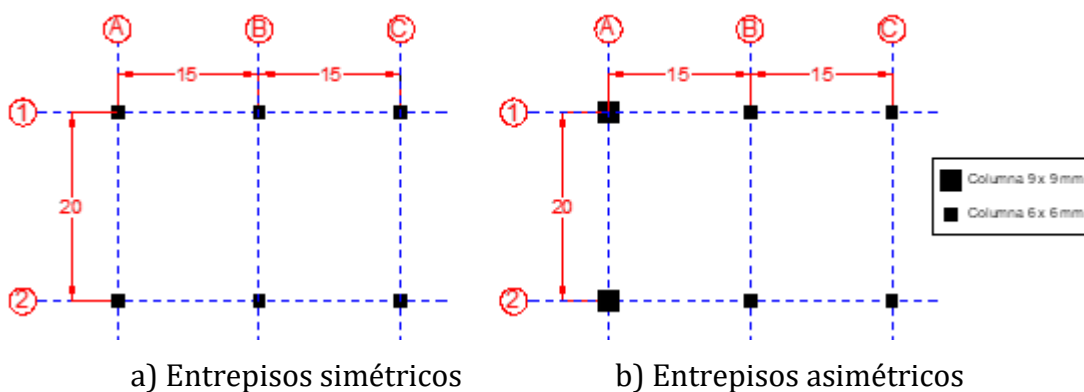


Figura 4.6 Configuraciones de columnas en los entrepisos de los modelos

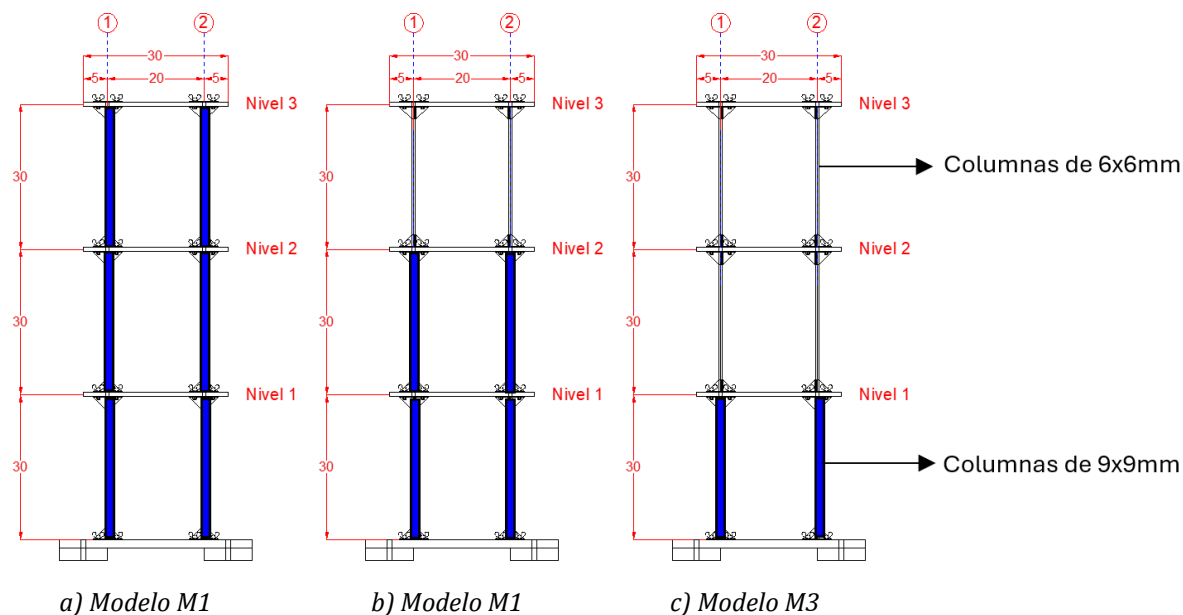


Figura 4.7 Configuraciones de columnas en el eje A de los modelos

Con estas características se determinaron los centros de torsión de los edificios aplicando el método matricial, Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Centros de cortante y de torsión en el entrepiso del modelo M1, obtenidos con el método matricial

Nivel o Entrepiso	CC		CTe		es		es/b	
	Xcc (cm)	Ycc (cm)	Xcte (cm)	Ycte (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	6.37	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	15.00	10.00	6.37	10.00	8.63	0.00	0.22	0.00
1	15.00	10.00	6.37	10.00	8.63	0.00	0.22	0.00

Tabla 4.2 Centros de masa y de torsión en el nivel del modelo M1, obtenidos con el método matricial

Nivel o Entrepiso	CM		CTn		es		es/b	
	Xcm (cm)	Ycm (cm)	Xctn (cm)	Yctn (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	6.37	10.00	8.63	0.00	0.22	0.00
2	15.00	10.00	6.37	10.00	8.63	0.00	0.22	0.00
1	15.00	10.00	6.37	10.00	8.63	0.00	0.22	0.00

Tabla 4.3 Centros de cortante y de torsión en el entrepiso del modelo M2, obtenidos con el método matricial

Nivel o Entrepiso	CC		CTe		es		es/b	
	Xcc (cm)	Ycc (cm)	Xcte (cm)	Ycte (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	15.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	15.00	10.00	6.37	10.00	8.63	0.00	0.22	0.00
1	15.00	10.00	6.37	10.00	8.63	0.00	0.22	0.00

Tabla 4.4 Centros de masa y de torsión en el nivel del modelo M2, obtenidos con el método matricial

Nivel o Entrepiso	CM		CTn		es		es/b	
	Xcm (cm)	Ycm (cm)	Xctn (cm)	Yctn (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	15.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	15.00	10.00	-5.58	10.00	20.58	0.00	0.51	0.00
1	15.00	10.00	6.37	10.00	8.63	0.00	0.22	0.00

Tabla 4.5 Centros de cortante y de torsión en el entrepiso del modelo M3, obtenidos con el método matricial

Nivel o Entrepiso	CC		CTe		es		es/b	
	Xcc (cm)	Ycc (cm)	Xcte (cm)	Ycte (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	15.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	15.00	10.00	15.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	15.00	10.00	6.37	10.00	8.63	0.00	0.22	0.00

Tabla 4.6 Centros de masa y de torsión en el nivel del modelo M3, obtenidos con el método matricial

Nivel o Entrepiso	CM		CTn		es		es/b	
	Xcm (cm)	Ycm (cm)	Xctn (cm)	Yctn (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	15.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	15.00	10.00	15.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	15.00	10.00	-34.80	10.00	49.80	0.00	1.24	0.00

4.5. Fase 2: Caracterización de los materiales.

Las propiedades mecánicas de los materiales de fabricación de los modelos se pueden obtener de las fichas técnicas proporcionadas por los proveedores, pero se puede hacer una verificación de estas con pruebas estandarizadas en el laboratorio de materiales. En el caso de los materiales de fabricación de los modelos de estudio, tabla 4.1, las propiedades se obtuvieron de las fichas técnicas proporcionadas por los proveedores y se corroboró el módulo de elasticidad del policarbonato sólido mediante una prueba axial instrumentada y una prueba de pandeo, Figura 4.8.

Tabla 4.7 Propiedades mecánicas de los materiales

Elemento estructural	Material	γ (kgf/m ³)	E (kgf/cm ²)	ν (1)
Columnas	Policarbonato sólido	1200	25000	0.37
Losas	Acrílico	1190	31627	0.37

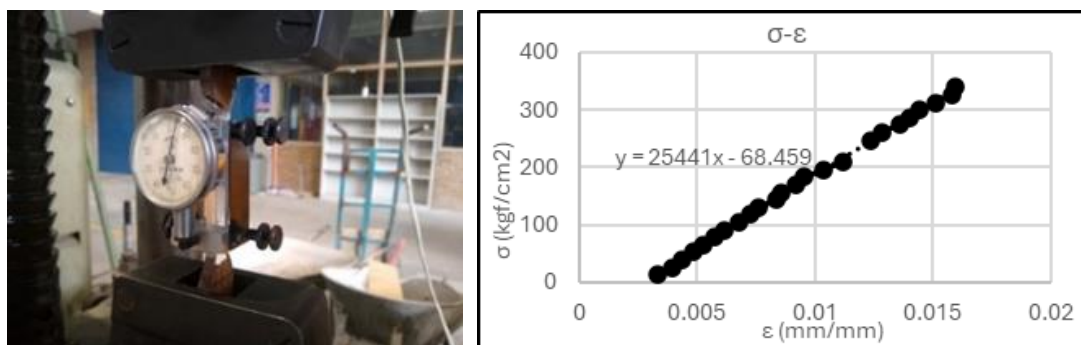


Figura 4.8 Determinación del módulo de elasticidad del policarbonato sólido a partir de una prueba axial instrumentada (Pérez Pontón, 2020).

4.6. Fase 3: Desarrollo del modelo numérico

Para predecir el comportamiento dinámico de los modelos físicos y diseñar el protocolo experimental, se desarrollaron modelos numéricos en software comercial ETABS versión 18.1.1, Figura 4.9, representando las columnas mediante elementos tipo barra y las losas y cartabones de conexión como elementos tipo placa. Las propiedades mecánicas de los materiales fueron descritas en la sección anterior.

Para considerar correctamente la masa de los modelos físicos se añadió la masa individual de cada conexión de manera puntual en los nodos correspondientes. Para representar las restricciones de movimiento de la base se emplearon empotramientos que es la condición de apoyo más cercana a la condición real.

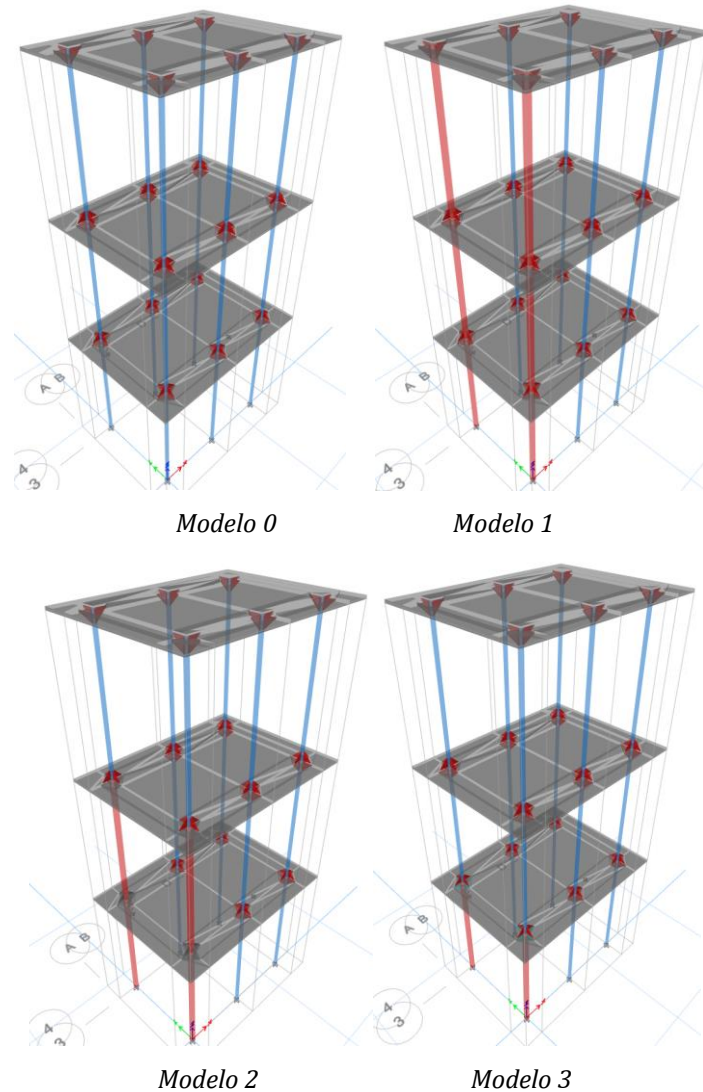


Figura 4.9 Modelos numéricos desarrollados en el software comercial ETABS

4.7. Fase 4: Protocolo experimental

El diseño del protocolo experimental se realiza en función de los fenómenos físicos a estudiar, los aprendizajes esperados, los resultados experimentales previstos y los recursos disponibles.

En apartados previos de este capítulo se trató el fenómeno físico a estudiar y los aprendizajes esperados. Respecto a los resultados experimentales previstos, la respuesta de los modelos fabricados depende de sus propiedades dinámicas y de la excitación empleada. Se buscó que la excitación sísmica inducida a la base de los modelos fuese tal que incrementara los efectos dinámicos de la estructura asimétrica sobre los de la simétrica, para hacer más notoria la desventaja de este tipo de comportamiento.

Los recursos disponibles para la realización de la práctica son las instalaciones del

Laboratorio de Materiales de la FI-UNAM, equipo de medición, masas adicionales, equipo de cómputo y visualización, el personal docente capacitado para la impartición de la práctica y el personal técnico de apoyo.

Desde la instalación de la mesa vibradora en el Laboratorio de Materiales, me he incorporado en el equipo responsable de su manejo. Con esta experiencia se ha determinado una forma de trabajo que permite el funcionamiento correcto de la mesa y una obtención adecuada de los datos. Esta forma de trabajo ha sido validada en múltiples ensayos desarrollados en distintos proyectos académicos, conformando un protocolo experimental fácilmente aplicable y repetible que se describe en los siguientes subcapítulos.

4.7.1. Revisión del estado del equipo y definición de parámetros del sistema de control para la operación de la mesa vibradora.

Esta actividad inicia con la revisión de la integridad de la mesa vibradora. Se verifica que las conexiones y mangueras del sistema hidráulico se encuentren en buenas condiciones y que los filtros continúen trabajando adecuadamente.

Adicionalmente, aunque las correderas deslizan sobre superficies de teflón, se ha observado que una ligera lubricación con grasa o aceite mejora significativamente la respuesta y suavidad del movimiento; por lo que rutinariamente se verifica que las correderas estén suficientemente engrasadas.

Previo a la ejecución de cualquier ensayo es necesario realizar un proceso de calentamiento del sistema hidráulico para llevar el aceite a su temperatura óptima de operación y garantizar que el fluido alcance la viscosidad adecuada para una respuesta eficiente del actuador. Este proceso se realiza induciendo a la mesa vibradora una señal senoidal de baja frecuencia (aproximadamente 0.5 Hz), con una amplitud del orden del 80% de la carrera máxima, trabajando durante el periodo de tiempo (aproximadamente 5 min) que permita que el termómetro de la unidad de potencia hidráulica alcance las condiciones de operación estables.

Dentro del programa de la mesa vibradora el primer paso a realizar es definir una nueva prueba introduciendo el desplazograma a reproducir como una función senoidal o mediante un archivo de texto que creado para la práctica donde se indique el incremento de tiempo de la muestra (Δt) y los valores de amplitud de desplazamiento.

Debido a la amplitud de aceleraciones de los experimentos que se desarrollan en la mesa vibradora, para la instrumentación de los modelos ha sido posible utilizar acelerómetros asequibles de tipo microelectromecánico (MEM), en particular el modelo ADXL203 con un rango de lectura de $\pm 1.7g$, Figura 4.10. Estos sensores tienen la capacidad de medir aceleración en dos ejes ortogonales, lo que requiere conectar a dos canales del sistema de adquisición de datos la entrada, salida y alimentación de cada dirección del sensor, conforme a las especificaciones del manual de operación de la mesa vibradora.

Para el registro de la información de los sensores particulares empleados, se configuran

los canales con los siguientes parámetros:

- Canal: Del 1 al 12 (según corresponda)
- Tipo de sensor: Voltaje 10 V máx.
- Tipo de ajuste: Constante
- Ganancia: x1
- Constante de ajuste: 1300
- Tipo de unidad: aceleración
- Unidad: cm/s^2



ANALOG DEVICES ADXL203 SENSOR 2 AXIS 1.7g

1. 5V OPERATION
2. CENTERED OUTPUTS (2.5V)
3. SENSITIVE – 1V/g
4. LOW NOISE (1mV)
5. ROBUST (3500g)
6. NO LF LIMIT – CAN BE USED AS A POSITION/TILT SENSOR

Figura 4.10 Modelos numéricos desarrollados en software comercial

4.7.2. Verificación de la correcta operación de sensores y canales de comunicación.

Previo a la prueba experimental, se verifica el estado del sistema de adquisición para garantizar la confiabilidad de los datos registrados y evitar la repetición de ensayos debido a fallas instrumentales. Esta verificación incluye:

- La correcta conexión de cada sensor al canal designado en el sistema de adquisición de datos.
- La ausencia de cables sueltos o daños en los conectores, que puedan introducir ruido a las señales.
- La confirmación de que cada canal transmite una señal estable y responde consistentemente a estímulos de prueba, como la orientación de los sensores en dirección vertical, la cual debe medir la aceleración gravitacional.

4.7.3. Diseño de los arreglos de sensores con base en el comportamiento o fenómeno a estudiar.

Es conveniente la revisión del modelo numérico para definir el lugar más adecuado para instrumentar los modelos físicos.

Se deben diseñar los arreglos de sensores que permitan determinar las propiedades dinámicas del modelo físico en estudio y otros arreglos que permitan medir la respuesta sísmica en puntos de interés. Para el caso de estudio se diseñaron tres arreglos de sensores que permiten la obtención experimental de las propiedades dinámicas de los modelos y un arreglo para la medición de su respuesta sísmica, fig. 4.10.

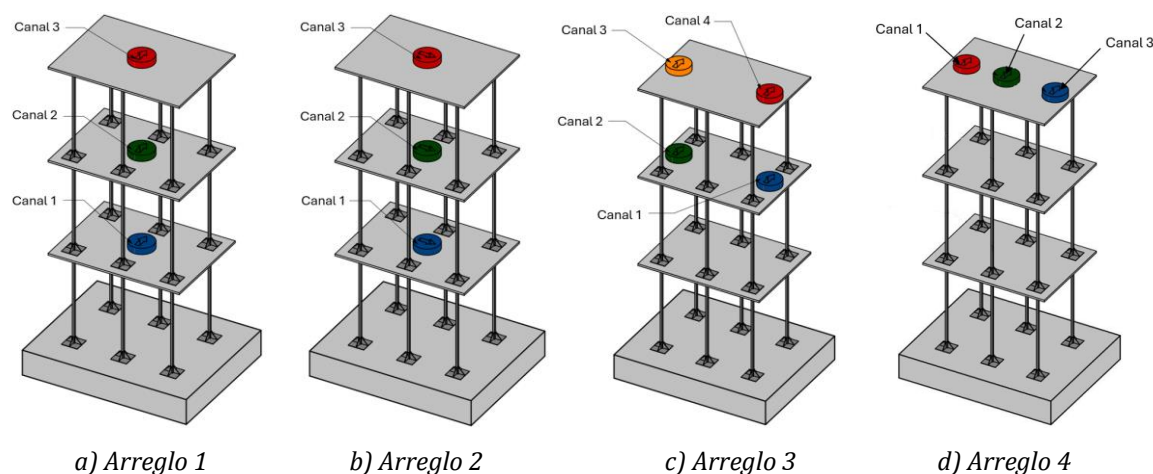


Figura 4.11 Instrumentación de los modelos para la obtención de propiedades dinámicas. Adaptado de Arévalo (2025).

En el primer arreglo se colocó un sensor al centro (centro de torsión) de cada nivel, todos orientados en la dirección transversal del edificio; en el segundo arreglo se orientaron en la dirección longitudinal y en el tercer arreglo los sensores se colocaron de manera excéntrica y únicamente en los niveles 2 y 3. Los primeros dos arreglos de sensores permitieron identificar frecuencias asociadas a modos de vibrar traslacionales de cada dirección y el tercer arreglo sirvió para determinar frecuencias de vibrar de los modos de torsión del modelo de referencia.

Finalmente, para medir las respuestas sísmicas de los modelos se diseñó el arreglo 4 de sensores que considera la instrumentación de tres puntos de la azotea de los edificios, con el fin de que en el modelo asimétrico se tenga un sensor en el centro de masas, otro del lado rígido y el último en el lado flexible, fig. 13.

4.7.4. Determinación experimental de las propiedades dinámicas del modelo físico

Para determinar las frecuencias asociadas a los modos de vibrar de los modelos, se indujo un desplazamiento inicial a la azotea en cada dirección ortogonal y en forma torsional, de manera independiente, para producir una respuesta en vibración libre. Se midió su respuesta en los puntos de control y se realizó un análisis de señales en el dominio de la frecuencia aplicando técnicas de Fourier.

En el caso del modelo de referencia M0 se obtuvieron espectros cruzados, funciones de coherencia, fase y transferencia, con las cuales se desarrolló un análisis de correlación de señales. Como ejemplo se muestra dicho análisis entre las señales de los canales 1 y 2 y entre los canales 2 y 3 del arreglo 1 de sensores, durante la respuesta en vibración libre del modelo 0, el cual se realizó en el instrumento virtual codificado en LabView por Castelán (2001), Figura 4.12 y Figura 4.13.

En el espectro cruzado se observan las frecuencias de 1.76 Hz, 5.17 Hz y 7.61 Hz, todas ellas con coherencia de 1 lo que implica que esas frecuencias pertenecen al sistema. Una vez identificadas se analiza el ángulo de fase entre los pares de señales registrados por los sensores 1-2 y 2-3. Se analiza si el valor es cercano a 0° o a 180° . Si el valor es cercano a 0° , se dice que el movimiento de los sensores está en fase; dos señales están en fase cuando sus formas de onda suben y bajan exactamente al mismo tiempo, sus picos (máximos) y valles (mínimos) coinciden en el eje del tiempo. Si el valor es cercano a 180° , las señales están en fase opuesta lo que indica que la forma de onda de una es la imagen invertida de la otra, es decir, cuando una señal alcanza su máximo, la otra alcanza su mínimo y viceversa. Con lo anterior podemos deducir a qué orden de modo de vibrar corresponde cada frecuencia.

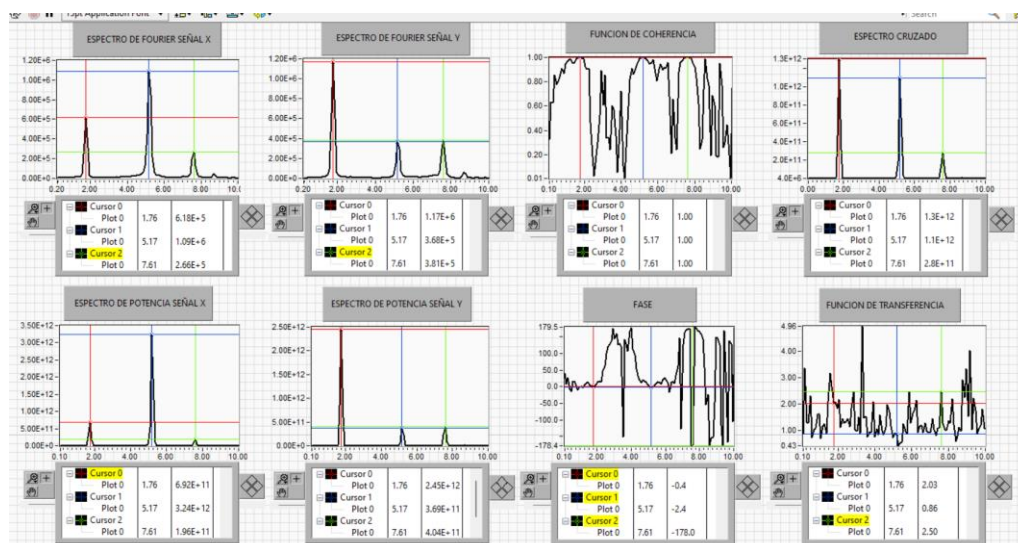


Figura 4.12 Relaciones entre las señales de los canales 1 y 2 del arreglo 1 de sensores

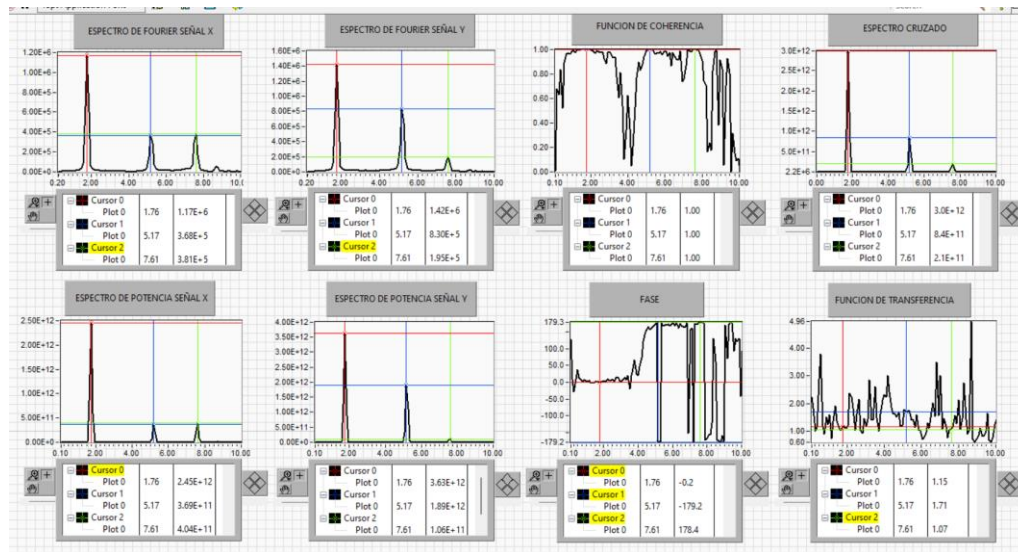


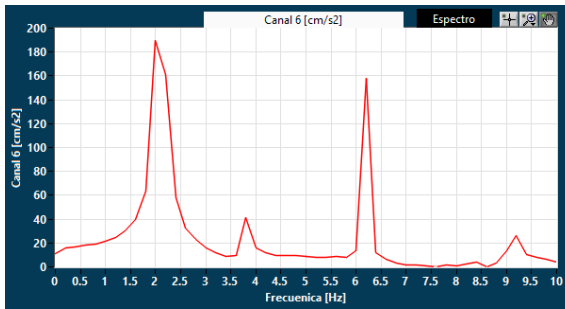
Figura 4.13 Relaciones entre las señales de los canales 2 y 3 del arreglo 1 de sensores

En la Tabla 4.8 se resumen los valores de periodos y frecuencias del modelo M0, obtenidos con el procedimiento descrito anteriormente.

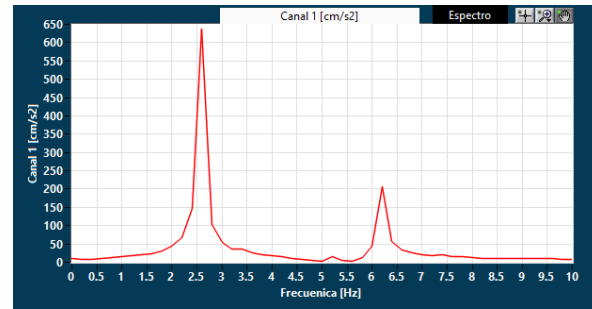
Tabla 4.8. Periodos y frecuencias del Modelo M0.

Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Dirección
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

Para los modelos asimétricos (M1, M2 y M3) fue posible identificar claramente solo 6 o 7 de sus 9 modos de vibrar teóricos, debido al acoplamiento modal y la complejidad de su respuesta. Los espectros de Fourier de las señales de respuesta generados por el software de la mesa vibradora en tiempo real facilitan la identificación de las frecuencias del vibrar de los modelos, Figura 4.14. En la Tabla 4.9 se resume el conjunto de frecuencias y periodos naturales obtenidos experimentalmente para este modelo.

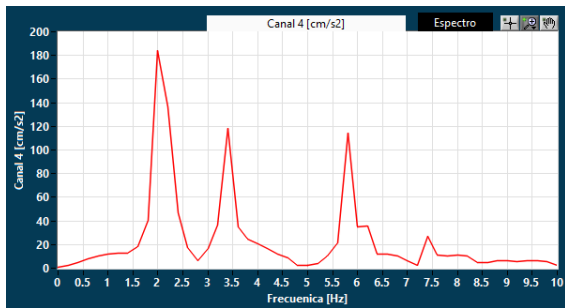


a) Dirección transversal

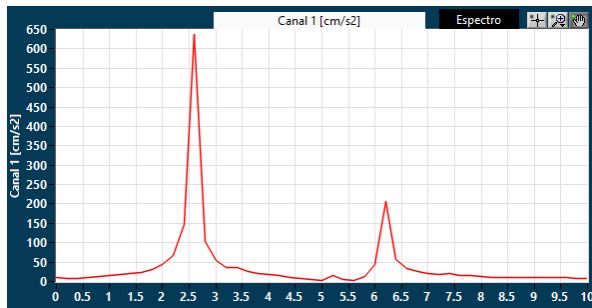


b) Dirección longitudinal

Figura 4.14 Espectros de Fourier de las señales registradas en el modelo M1 con los arreglos 1 y 2, durante sus respuestas en vibración libre.

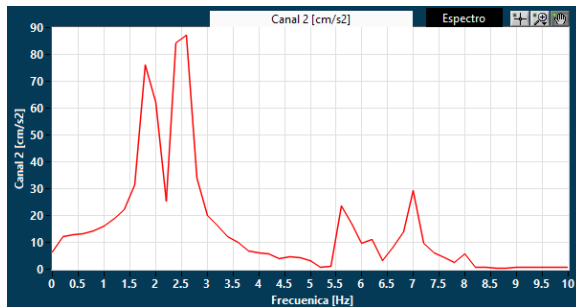


a) Dirección transversal

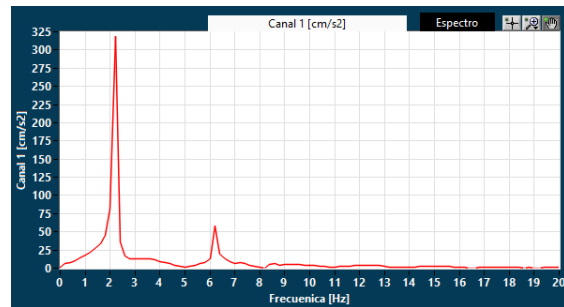


b) Dirección longitudinal

Figura 4.15 Espectros de Fourier de las señales registradas en el modelo M2 con los arreglos 1 y 2, durante sus respuestas en vibración libre.



a) Dirección transversal



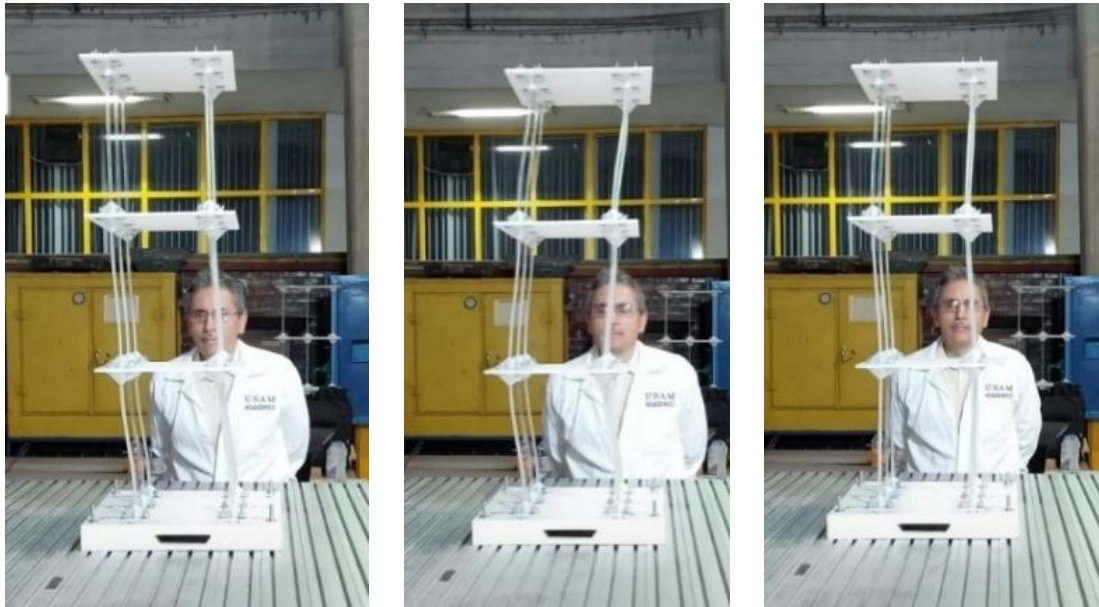
b) Dirección longitudinal

Figura 4.16 Espectros de Fourier de las señales registradas en el modelo M3 con los arreglos 1 y 2, durante sus respuestas en vibración libre.

Tabla 4.9 Periodos de vibrar del modelo M-1, determinados de forma experimental

Modelo	Dirección	Modo	Experimental	
			f (Hz)	T (s)
Modelo 1	Transversal	1	2.1	0.476
		2	3.8	0.263
		3	6.2	0.161
		4	9.2	0.109
	Longitudinal	1	2.7	0.370
		2	7.8	0.128
Modelo 2	Transversal	1	2.0	0.500
		2	3.4	0.294
		3	5.8	0.172
		4	7.4	0.135
	Longitudinal	1	2.6	0.385
		2	6.2	0.161
Modelo 3	Transversal	1	1.9	0.526
		2	2.5	0.400
		3	5.6	0.179
		4	7	0.143
		5	8	0.125
	Longitudinal	1	2.2	0.455
		2	6.2	0.161

Un ensayo de alto valor didáctico y formativo para los estudiantes consiste en observar cómo se desarrollan las formas modales, aplicando en la base del modelo físico una señal armónica de frecuencia creciente (barrido de frecuencias), la cual permite excitar los distintos modos de vibrar del modelo físico estudiado, fig. 15, mostrando a los alumnos un fenómeno que, por lo general, se limita al ámbito teórico o, en el mejor de los casos, a simulaciones numéricas. Cuando la frecuencia de excitación coincide con una frecuencia natural del modelo físico, la respuesta estructural se amplifica, lo que deja ver con claridad la configuración deformada característica de cada modo, ya sea traslacional, torsional o acoplada, fig. 4.14.



a) Primer modo

b) Segundo modo

c) Tercer modo

Figura 4.17 Formas de vibrar traslacionales de la dirección transversal del modelo M0

Se determinó el amortiguamiento del primer modo de vibrar de cada dirección del modelo, induciendo vibración libre, registrando la respuesta y aplicando el método del decremento logarítmico, Figura 4.18. En el caso particular que se está analizando se obtuvo un amortiguamiento similar en ambas direcciones, con un valor $\xi \approx 1.5\%$.

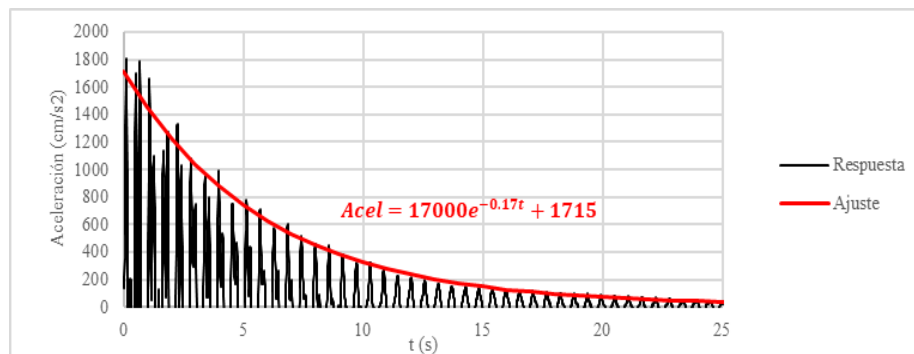


Figura 4.18 Decremento logarítmico de la respuesta de la estructura

4.7.5. Calibración del modelo analítico con base en resultados experimentales

Con las propiedades dinámicas obtenidas en forma experimental de los modelos M0 y M1, se debe revisar que el modelo numérico arroje resultados congruentes o de lo contrario se deberá calibrar el mismo hasta que su respuesta sea representativa del modelo físico. El proceso de calibración debe realizarse en forma racional y debidamente fundamentado, analizado las posibles incertidumbres en las variables involucradas (masa y rigidez).

Dado que la geometría y la masa del modelo estaban correctamente caracterizadas, las discrepancias se atribuyen principalmente a variaciones en la rigidez. Como las propiedades mecánicas de los materiales se verificaron, la fuente más probable de incertidumbre fue la rigidez a flexión y torsión de las conexiones.

El proceso de calibración consistió en ajustar el módulo de elasticidad equivalente de los cartabones de las conexiones y aumentar la rigidez torsional de las columnas para simular la rigidez real del conjunto columna-conexión.

Tras estos ajustes, los porcentajes de error entre los periodos numéricos y experimentales se redujeron a niveles menores al 6%, los cuales se consideran aceptables, Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Comparación de los periodos de vibrar numéricos y experimentales del modelo M0

Modo	Experimental		Numérico	Diferencia	Dominancia
	f (Hz)	T (s)	T (s)		
1	1.76	0.568	0.560	1.4%	1er modo en traslación en dir. transversal
2	1.76	0.568	0.558	1.8%	1er modo en traslación en dir. longitudinal
3	2.08	0.481	0.488	1.5%	1er modo en torsión
4	5.17	0.193	0.197	1.8%	2do modo en traslación en dir. transversal
5	5.27	0.190	0.197	3.8%	2do modo en traslación en dir. longitudinal
6	6.04	0.166	0.173	4.5%	2do modo en torsión
7	7.61	0.131	0.134	2.0%	3er modo en traslación en dir. transversal
8	7.61	0.131	0.134	2.0%	3er modo en traslación en dir. longitudinal
9	8.51	0.118	0.119	1.3%	3er modo en torsión

Tabla 4.11. Comparación de los periodos de vibrar numéricos y experimentales de los modelos asimétricos (M1 a M3)

Modelo	Dirección	Modo	Experimental		Numérico	Diferencia
			f (Hz)	T (s)	T (s)	
Modelo 1	Transversal	1	2.1	0.476	0.458	3.8%
		2	3.8	0.263	0.278	5.6%
		3	6.2	0.161	0.161	0.2%
		4	9.2	0.109	0.110	1.2%
	Longitudinal	1	2.7	0.370	0.384	3.7%
		2	7.8	0.128	0.133	3.7%
Modelo 2	Transversal	1	2.0	0.500	0.466	6.8%
		2	3.4	0.294	0.310	5.4%
		3	5.8	0.172	0.178	3.2%
		4	7.4	0.135	0.144	6.6%
	Longitudinal	1	2.6	0.385	0.402	4.5%
		2	6.2	0.161	0.170	5.4%
Modelo 3	Transversal	1	1.9	0.526	0.501	4.8%
		2	2.5	0.400	0.399	0.3%
		3	5.6	0.179	0.181	1.4%
		4	7	0.143	0.148	3.6%
		5	8	0.125	0.127	1.6%
	Longitudinal	1	2.2	0.455	0.463	1.9%
		2	6.2	0.161	0.170	5.4%

En el modelo asimétrico (M1), la respuesta dinámica presenta modos de vibrar acoplados (traslación-torsión), algunos de los cuales resultan complejos, por ejemplo, el modelo numérico mostró un modo torsional en el que lado rígido del modelo experimenta amplitudes de vibración mayores que el lado flexible. Este comportamiento fue confirmado experimentalmente durante un ensayo de barrido de frecuencias, donde se observó claramente la activación de este modo en su frecuencia natural correspondiente, Figura 4.19.

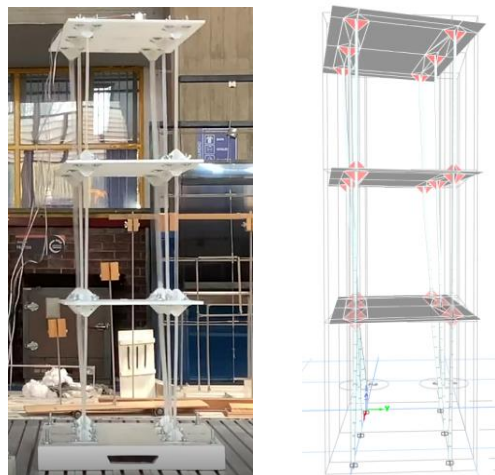


Figura 4.19 Modo de vibrar torsional del modelo M1

Para lograr congruencia entre la predicción numérica y la evidencia experimental es esencial utilizar prototipos físicos cuya geometría, materiales y comportamiento estructural puedan ser representados por los estudiantes con los conocimientos que poseen.

Con el modelo numérico calibrado fue posible calcular los centros de torsión de una manera más sencilla, Tabla 4.12 a Tabla 4.17. Se desactivó el grado de libertad de torsión y se aplicó la metodología descrita en el capítulo de torsión.

Tabla 4.12 Centros de cortante y de torsión en el entrepiso del modelo M1, obtenidos con el software comercial

Nivel o Entrepiso	CC		CTe		es		es/b	
	Xcc (cm)	Ycc (cm)	Xcte (cm)	Ycte (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	7.75	10.04	7.25	-0.04	0.18	0.00
2	15.00	10.00	7.69	9.99	7.31	0.01	0.18	0.00
1	15.00	10.00	6.97	9.98	8.03	0.02	0.20	0.00

Tabla 4.13 Centros de masa y de torsión en el nivel del modelo M1, obtenidos con el software comercial

Nivel o Entrepiso	CM		CTn		es		es/b	
	Xcm (cm)	Ycm (cm)	Xctn (cm)	Yctn (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	7.75	10.04	7.25	-0.04	0.18	0.00
2	15.00	10.00	7.60	9.93	7.40	0.07	0.19	0.00
1	15.00	10.00	3.57	9.90	11.43	0.10	0.29	0.00

Tabla 4.14 Centros de cortante y de torsión en el entrepiso del modelo M2, obtenidos con el software comercial

Nivel o Entrepiso	CC		CTe		es		es/b	
	Xcc (cm)	Ycc (cm)	Xcte (cm)	Ycte (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	14.95	9.91	0.05	0.09	0.00	0.00
2	15.00	10.00	7.62	9.99	7.38	0.01	0.18	0.00
1	15.00	10.00	6.97	9.97	8.03	0.03	0.20	0.00

Tabla 4.15 Centros de masa y de torsión en el nivel del modelo M2, obtenidos con el software comercial

Nivel o Entrepiso	CM		CTn		es		es/b	
	Xcm (cm)	Ycm (cm)	Xctn (cm)	Yctn (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	14.95	9.91	0.05	0.09	0.00	0.00
2	15.00	10.00	-2.56	10.10	17.56	-0.10	0.44	0.00
1	15.00	10.00	3.90	9.90	11.10	0.10	0.28	0.00

Tabla 4.16 Centros de cortante y de torsión en el entrepiso del modelo M3, obtenidos con el software comercial

Nivel o Entrepiso	CC		CTe		es		es/b	
	Xcc (cm)	Ycc (cm)	Xcte (cm)	Ycte (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	15.11	10.07	-0.11	-0.07	0.00	0.00
2	15.00	10.00	15.06	10.01	-0.06	-0.01	0.00	0.00
1	15.00	10.00	6.89	9.98	8.11	0.02	0.20	0.00

Tabla 4.17 Centros de masa y de torsión en el nivel del modelo M3, obtenidos con el software comercial

Nivel o Entrepiso	CM		CTn		es		es/b	
	Xcm (cm)	Ycm (cm)	Xctn (cm)	Yctn (cm)	X	Y	X	Y
3	15.00	10.00	15.11	10.07	-0.11	-0.07	0.00	0.00
2	15.00	10.00	15.00	9.93	0.00	0.07	0.00	0.00
1	15.00	10.00	-30.86	9.86	45.86	0.14	1.15	0.00

A continuación, se presenta una comparación de las excentricidades obtenidas con el método matricial y con el software comercial, únicamente para la dirección X y para cada uno de los modelos en estudio, Tabla 4.18 a

Tabla 4.20.

Tabla 4.18 Comparación de las excentricidades obtenidas con el método matricial y con el software comercial para el modelo M1

es/b entrepiso		Diferencia	es/b nivel		Diferencia
Matricial	ETABS		Matricial	ETABS	
0.22	0.18	19.1%	0.22	0.18	19.1%
0.22	0.18	18.0%	0.22	0.19	16.5%
0.22	0.20	7.4%	0.22	0.29	-24.5%

Tabla 4.19 Comparación de las excentricidades obtenidas con el método matricial y con el software comercial para el modelo M2

es/b entrepiso		Diferencia	es/b nivel		Diferencia
Matricial	ETABS		Matricial	ETABS	
0.00	0.00	0.0%	0.00	0.00	0.0%
0.22	0.18	16.9%	0.51	0.44	17.2%
0.22	0.20	7.4%	0.22	0.28	-22.2%

Tabla 4.20 Comparación de las excentricidades obtenidas con el método matricial y con el software comercial para el modelo M3

es/b		Diferencia	es/b		Diferencia
Matricial	ETABS		Matricial	ETABS	
0.00	0.00	0.0%	0.00	0.00	0.0%
0.00	0.00	0.0%	0.00	0.00	0.0%
0.22	0.20	6.4%	1.24	1.15	8.6%

4.7.6. Selección de la excitación sísmica.

La selección de la señal sísmica se realizó considerando su intensidad y contenido de frecuencias, de modo que generarán desplazamientos lo suficiente grandes para hacer visible el fenómeno de interés. A menudo es necesario escalar la señal para amplificar la respuesta y facilitar su observación o, por el contrario, atenuar para prevenir daños en el modelo físico.

En el caso de esta práctica se seleccionó la componente EW del registro obtenido en la estación "GRANJAS" durante el sismo del 19 de septiembre de 2017. Dado que la amplitud original de la señal no generaba una respuesta suficientemente visible en los modelos físicos, esta se escaló al 300%, Figura 4.20, para inducir una respuesta claramente observable en el modelo. Los espectros de respuesta en términos de desplazamiento y de amplitudes de Fourier, Figura 4.21, muestran que se tendrá una mayor demanda en el modelo asimétrico (M1), cumpliendo con el objetivo didáctico de destacar los efectos de la asimetría estructural.

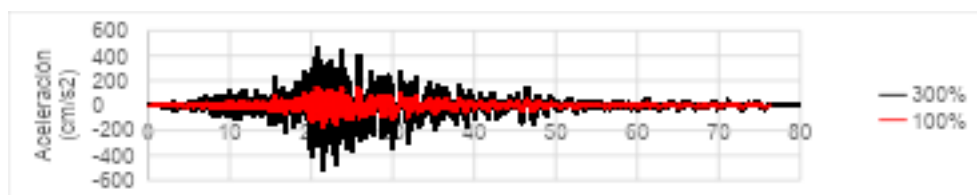


Figura 4.20 Aceleración del sismo 19092017-EW-GRANJAS y su escalado al 300%

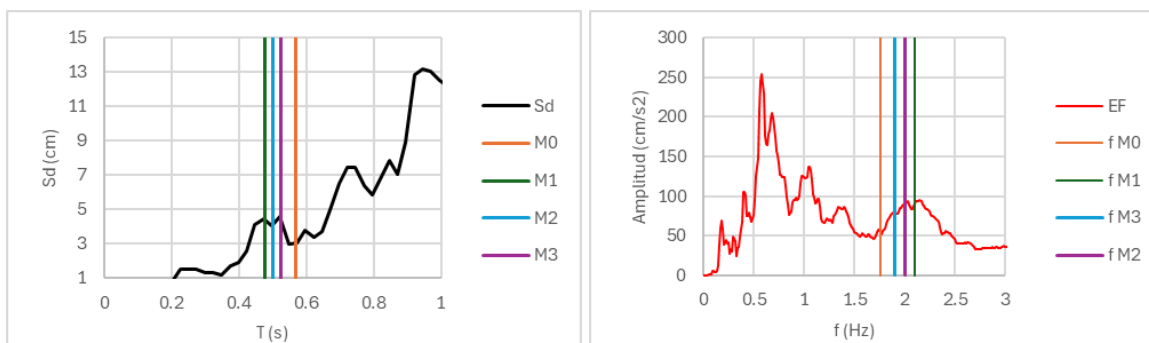


Figura 4.21 Espectro de respuesta en términos de desplazamiento y espectro de Fourier, calculados para la señal empleada, en los que se indica el periodo/frecuencia de vibrar dominante de los modelos en estudios.

Como la mesa vibradora se controla por desplazamientos. Por ello, para inducir un registro sísmico real, fue necesario integrar la señal de aceleración dos veces y así obtener el desplazograma correspondiente, Figura 4.22.

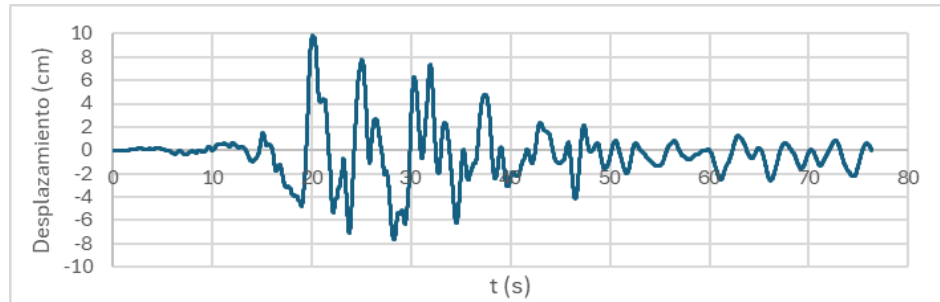


Figura 4.22 Desplazograma del sismo 19092017-EW-GRANJAS escalado al 300%

4.7.7. Verificación de la congruencia entre las señales de entrada y salida de la mesa vibradora.

Se verificó la congruencia entre las señales de entrada y salida comparándolas en los dominios del tiempo y la frecuencia. Al comparar los desplazogramas de entrada y salida, Figura 4.22, se observa una excelente congruencia; sin embargo, en el caso de la aceleración, Figura 4.23, se identifican picos producidos durante los cambios de dirección de la mesa, los cuales están asociados a un ruido inherente del sistema debido a sus características mecánicas y de operación, por lo que no pueden eliminarse. Un análisis en el dominio de la frecuencia, Figura 4.25, confirma que este ruido se amplifica a frecuencias más altas. Debido a esto, para evaluar la respuesta dinámica en el modelo numérico se empleó la aceleración real de la mesa como entrada o excitación en la base.

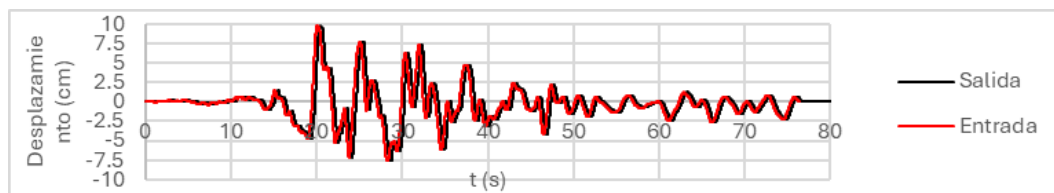


Figura 4.23 Comparación de los desplazamientos de entrada y salida

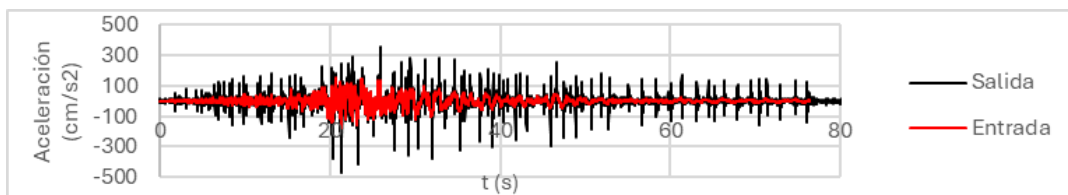


Figura 4.24 Comparación de las aceleraciones de entrada y salida

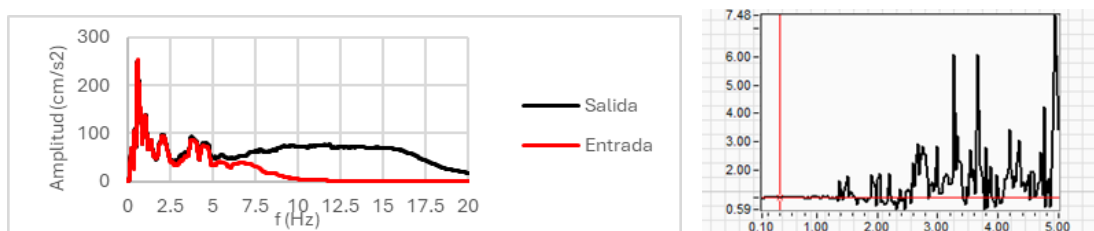


Figura 4.25 Espectros de Fourier y función de transferencia de la entrada y la salida

4.8. Fase 5: Ensayo dinámico

En esta etapa se realizan los ensayos en la mesa vibradora bajo las excitaciones dinámicas planificadas, registrando la respuesta estructural. Antes de cada ensayo se lleva a cabo una verificación de los siguientes aspectos, con el fin de tener una mayor confiabilidad en los resultados esperados:

1. Fijación, orientación y estado del modelo.
2. Conexión y configuración de sensores.
3. Selección y verificación de la señal de entrada.
4. Configuración del sistema de adquisición.

Una vez completada esta verificación, se procede a ejecutar el ensayo. En el caso particular analizado se pretende observar la respuesta de los modelos físicos ante la acción de un registro sísmico real, por lo que se reproduce la señal y se registran las respuestas en los puntos de control correspondientes.

En las figs. 4.26 a 4.35 se presentan los registros de aceleración obtenidos en los puntos de control (Canales 1 a 3) de los cuatro modelos de estudio durante el ensayo sísmico.

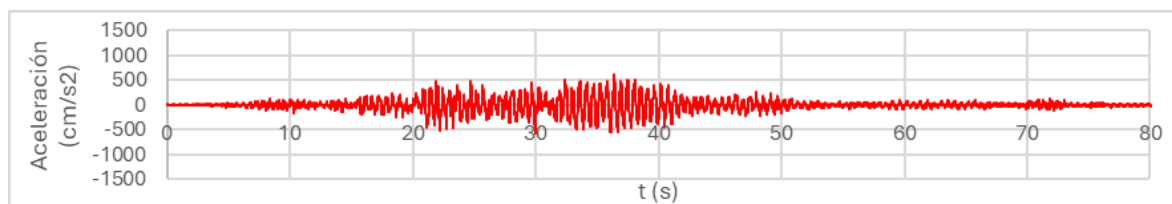


Figura 4.26 Respuesta en la azotea del modelo M0 (canales 1, 2 y 3)

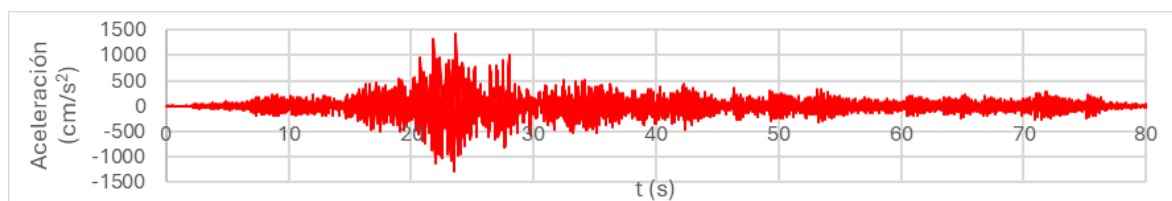


Figura 4.27 Respuesta en la azotea del modelo M1 del lado rígido (eje A, canal 1)

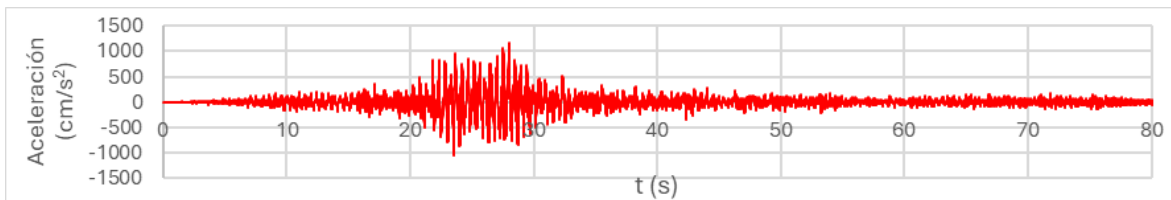


Figura 4.28 Respuesta en la azotea del modelo M1 al centro (eje B, canal 2)

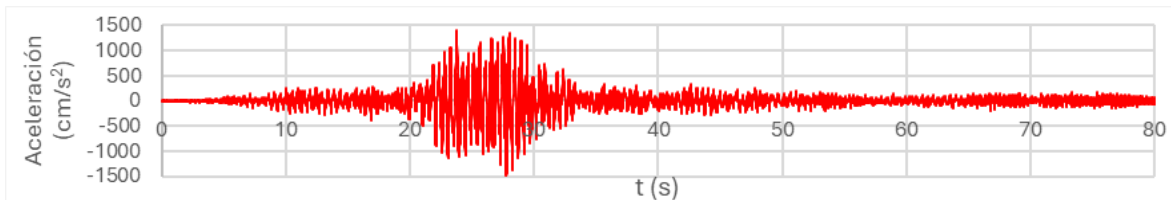


Figura 4.29 Respuesta en la azotea del modelo M1 del lado flexible (eje C, canal 3)

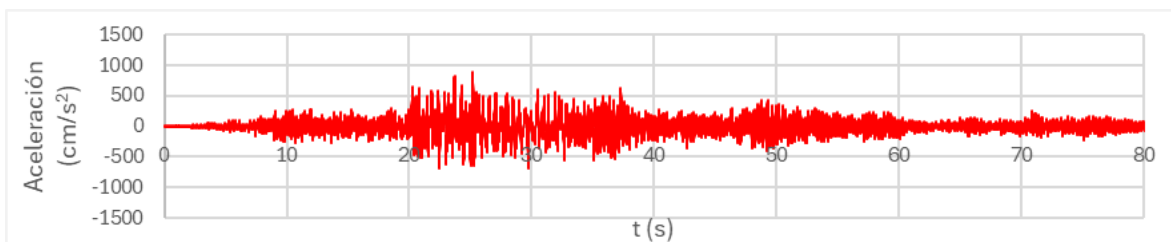


Figura 4.30 Respuesta en la azotea del modelo M2 del lado rígido (eje A, canal 1)

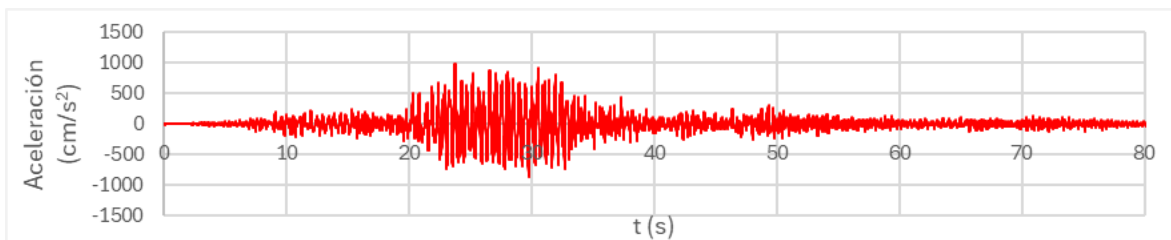


Figura 4.31 Respuesta en la azotea del modelo M2 al centro (eje B, canal 2)

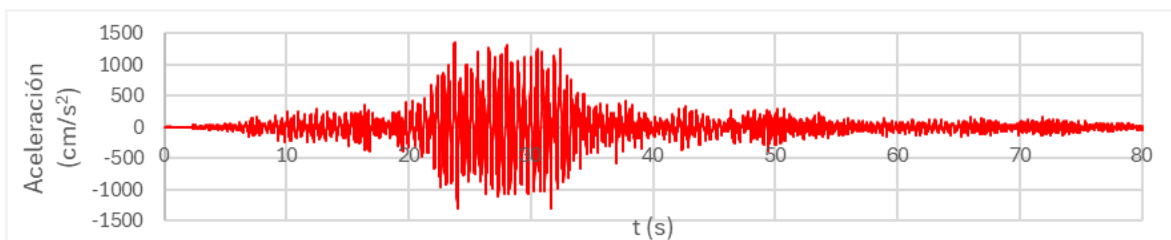


Figura 4.32 Respuesta en la azotea del modelo M2 del lado flexible (eje C, canal 3)

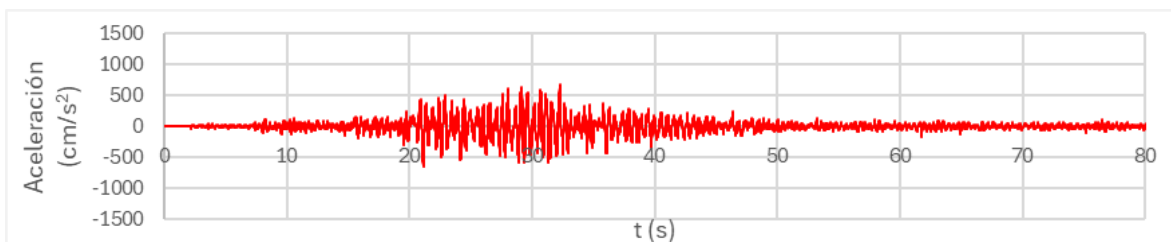


Figura 4.33 Respuesta en la azotea del modelo M3 del lado rígido (eje A, canal 1)

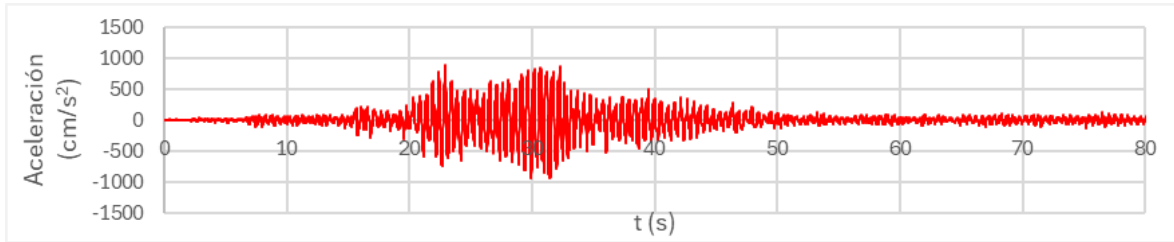


Figura 4.34 Respuesta en la azotea del modelo M3 al centro (eje B, canal 2)

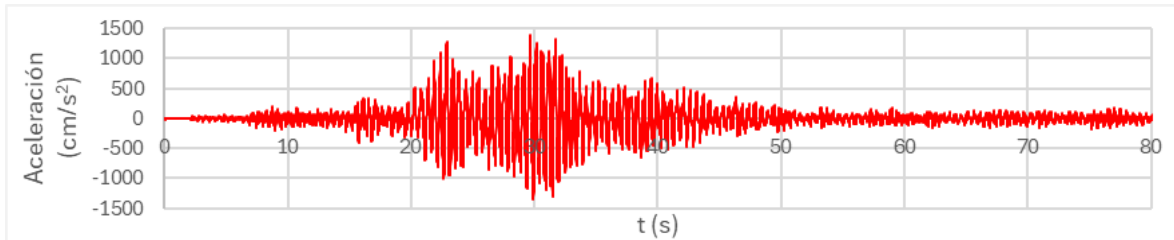


Figura 4.35 Respuesta en la azotea del modelo M3 del lado flexible (eje C, canal 3)

De los resultados se destacan las siguientes observaciones:

- Respecto al modelo M0: debido a su simetría estructural, la respuesta registrada en los tres puntos de control fue prácticamente la misma, por lo que solo se presenta la gráfica de una de ellas.
- Respecto al modelo M1: La señal sísmica seleccionada permitió obtener mayor demanda de desplazamientos que en el modelo M1, haciendo más claro su comportamiento acoplado. En el lado rígido del modelo M2 la respuesta se caracteriza por presentar altas frecuencias, consistentes con la mayor rigidez lateral del plano resistente (eje A), mientras que en el lado flexible (eje C) la respuesta presenta menores componentes de alta frecuencia, pero mayores amplitudes de desplazamiento.
- Comparación entre modelos: la configuración geométrica propuesta permitió observar la diferencia entre la respuesta dinámica de un modelo simétrico y uno asimétrico en rigidez. En este último, se observó el acoplamiento torsional esperado, resultando en demandas de aceleración significativamente diferentes en cada eje.

4.9. Fase 6: Análisis comparativo y validación de la metodología

La fase final de la metodología consistió en el análisis comparativo de las respuestas dinámicas obtenidas experimentalmente y las predichas por el modelo numérico calibrado. El proceso de calibración descrito en la sección 6.6 permitió obtener modelos numéricos cuyas propiedades dinámicas coincidieron con las de los prototipos o modelos físicos. Se realizó un análisis dinámico paso a paso y se obtuvo la respuesta de los modelos ante la excitación sísmica aplicada experimentalmente, utilizando como entrada la aceleración real de la mesa vibradora.

En las figs. 28 a 31 se presenta la superposición de las respuestas, experimentales y numéricas, en términos de aceleración, de los puntos de control de la azotea de ambos modelos.

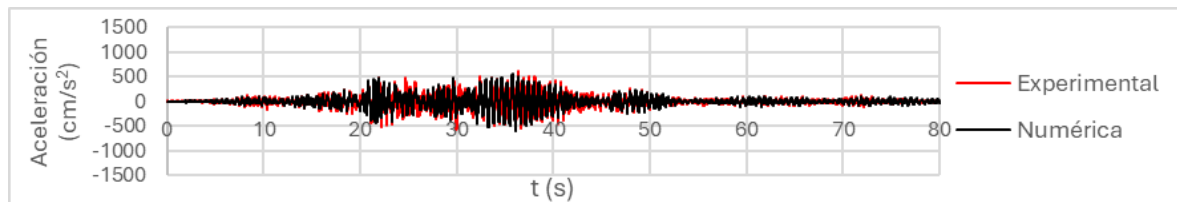


Figura 4.36 Respuesta en la azotea del modelo M0

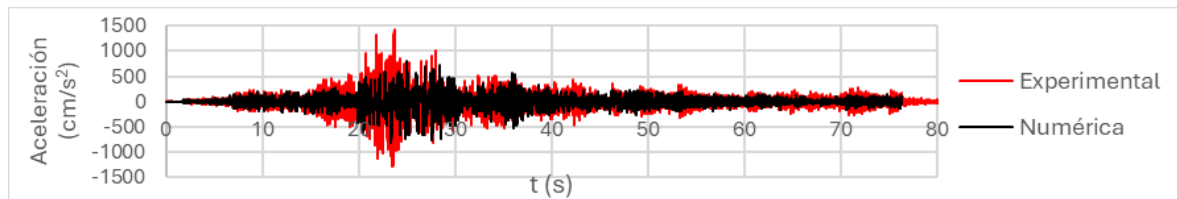


Figura 4.37 Respuesta en la azotea del modelo M1 del lado rígido (eje A)

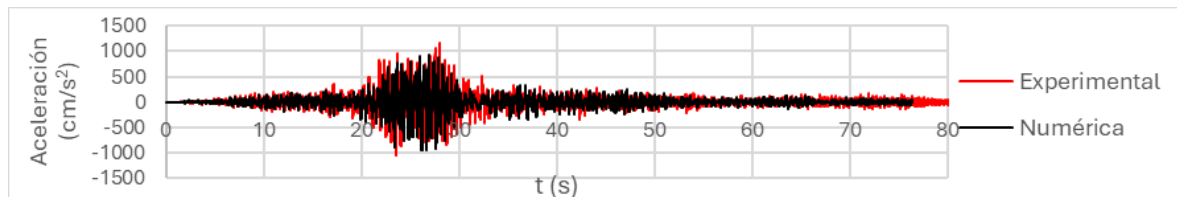


Figura 4.38 Respuesta en la azotea del modelo M1 al centro (eje B)

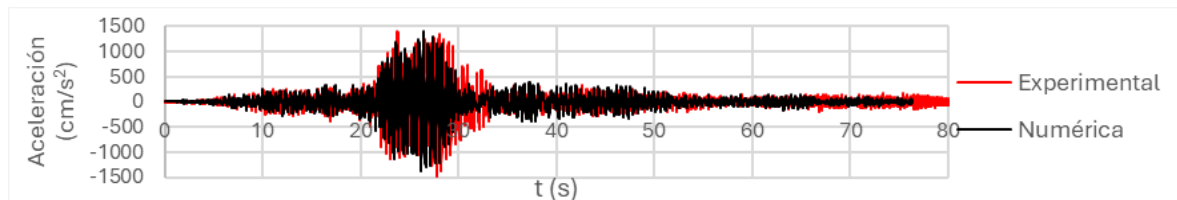


Figura 4. 39 Respuesta en la azotea del modelo M1 del lado flexible (eje C)

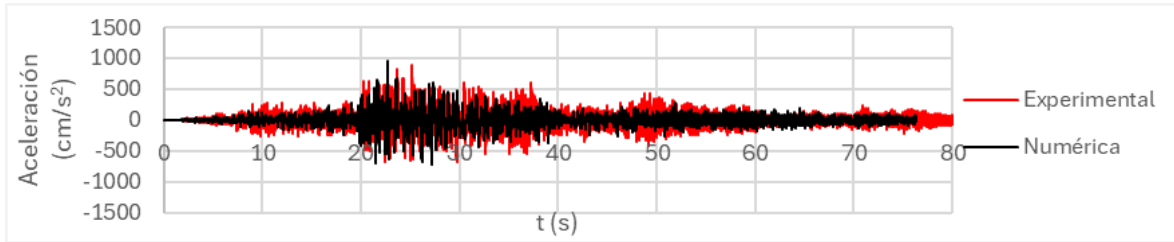


Figura 4.40 Respuesta en la azotea del modelo M2 del lado rígido (eje A)

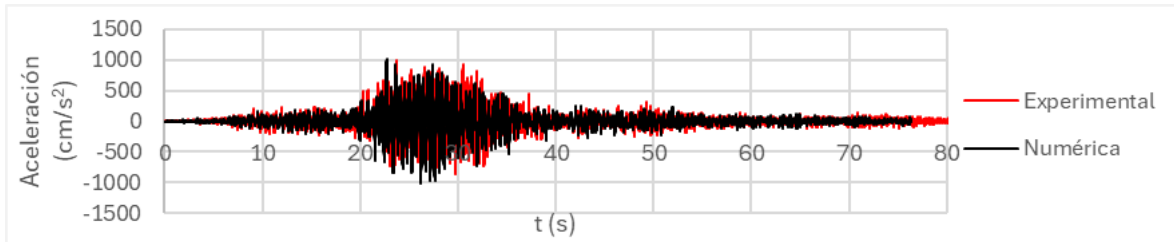


Figura 4.41 Respuesta en la azotea del modelo M2 al centro (eje B)

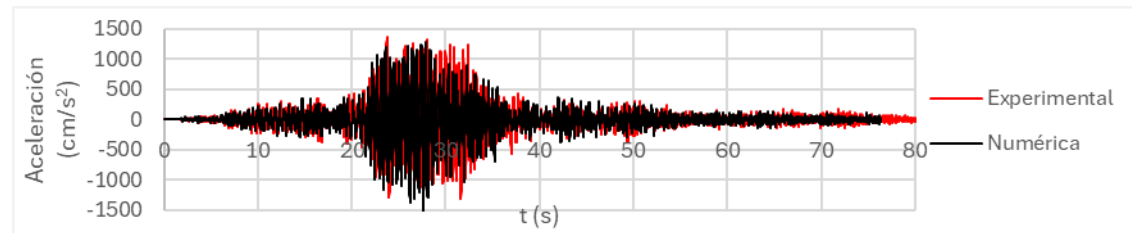


Figura 4.42 Respuesta en la azotea del modelo M2 del lado flexible (eje C)

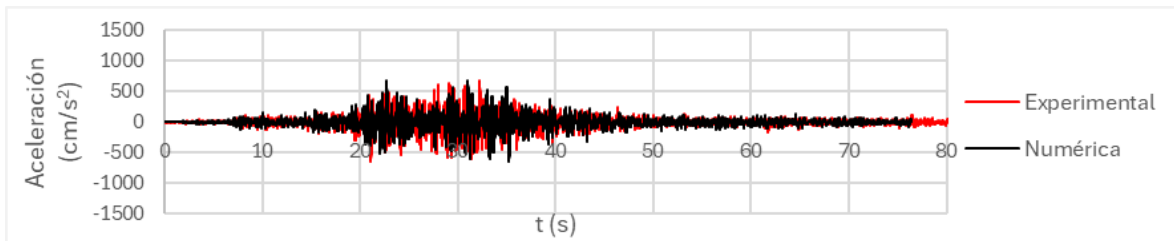


Figura 4.43 Respuesta en la azotea del modelo M3 del lado rígido (eje A)

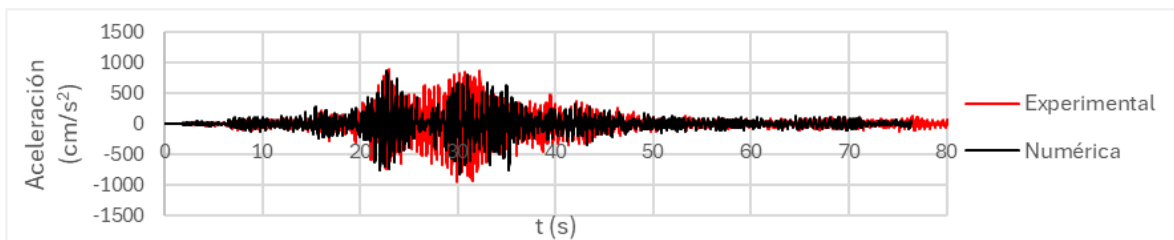


Figura 4.44 Respuesta en la azotea del modelo M3 al centro (eje B)

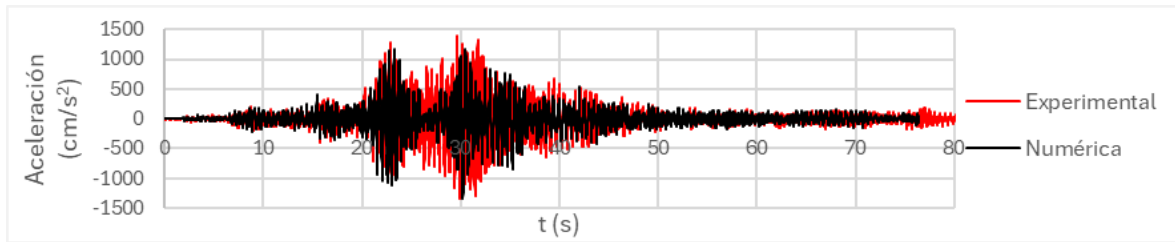


Figura 4.45 Respuesta en la azotea del modelo M3 del lado flexible (eje C)

En todos los casos se observa una adecuada correspondencia en los resultados, por lo que se puede concluir que los modelos numéricos están reproduciendo de manera adecuada el comportamiento de los modelos físicos. Las señales son congruentes tanto en amplitud como en la presencia y duración de la fase intensa de movimiento.

Este ejercicio de comparación proporciona a los estudiantes una evidencia tangible de que las herramientas de software de uso común, cuando son utilizadas y calibradas correctamente, pueden predecir con precisión razonable el comportamiento dinámico de las estructuras. Así, se fortalece su confianza en la modelación computacional y se consolida el ciclo de aprendizaje que conecta la teoría, la experimentación y la simulación.

La única discrepancia relevante se observa del lado rígido del modelo asimétrico M2, en la que la respuesta experimental presenta picos de aceleración que el modelo numérico no es capaz de reproducir. Esta diferencia se puede atribuir a fuentes de ruido experimental, vibraciones inducidas por los elementos de conexión o a la posible influencia de modos de vibrar locales no considerados en la modelación numérica simplificada.

5. MANUAL DE PRÁCTICA: “TORSIÓN SÍSMICA ELÁSTICA DE EDIFICIOS”

5.1. Objetivo

Visualizar el fenómeno de torsión sísmica en un modelo físico ensayado en mesa vibradora y mostrar su respuesta ante la acción de un registro sísmico real. Se caracterizarán dos modelos estructurales representativos de edificios de 3 niveles, con y sin asimetría en rigidez.

De manera complementaria, se espera que los alumnos observen conceptos como la obtención de modos de vibrar (periodos y formas modales) y la disminución de la respuesta estructural debida a los mecanismos de disipación de energía (amortiguamiento). Esta práctica también presenta un acercamiento del alumno al tema de instrumentación de edificios, que es una técnica empleada para determinar las propiedades dinámicas de estructuras reales a partir de su respuesta en vibración libre o forzada.

5.2. Seguridad en la ejecución

La zona de trabajo de la mesa vibradora está delimitada por una franja amarilla que la rodea y queda prohibido el ingreso a esta área mientras el equipo se encuentre en funcionamiento.

5.3. Marco teórico

5.3.1. Aspectos generales del diseño sísmico de edificios

El diseño sismorresistente tiene como propósito garantizar que las edificaciones conserven su integridad estructural y funcional ante la acción de un sismo severo. Su objetivo no es eliminar los daños, sino controlar su magnitud para que no comprometan la estabilidad global de la estructura ni la vida de los ocupantes (CFE, 2020).

En México, la normatividad establece que los edificios deben diseñarse considerando el nivel de desempeño esperado ante diferentes intensidades sísmicas. Este concepto, conocido como diseño por desempeño, implica que una estructura debe permanecer elásticamente resistente frente a sismos frecuentes y plásticamente dúctil frente a sismos excepcionales (Bazán & Meli, 1985).

El diseño por capacidad complementa este enfoque al establecer que los elementos estructurales deben jerarquizarse de manera que los componentes frágiles, como columnas o conexiones, no fallen antes que los elementos dúctiles, como vigas o muros de corte (CFE, 2020). De este modo, la

energía sísmica se disipa controladamente en zonas previamente definidas, denominadas articulaciones plásticas.

Los edificios deben concebirse de forma regular tanto en planta como en elevación, evitando asimetrías en masa o rigidez, que generan acoplamientos en las vibraciones traslacionales y torsionales de una edificación y, por lo tanto, concentraciones de esfuerzos o desplazamientos en algunas partes de la estructura. Este tipo de irregularidad estructural es una de las principales causas de fallas por torsión, como se ha observado en diversos eventos sísmicos históricos (García, 2019).

5.3.2. Torsión sísmica en edificios

La torsión sísmica de un edificio es básicamente el giro que experimenta un edificio alrededor de un eje vertical. Este tipo de comportamiento puede producirse por una configuración asimétrica en masas o rigideces, Figura 5.1, tanto en planta como en la elevación del edificio.

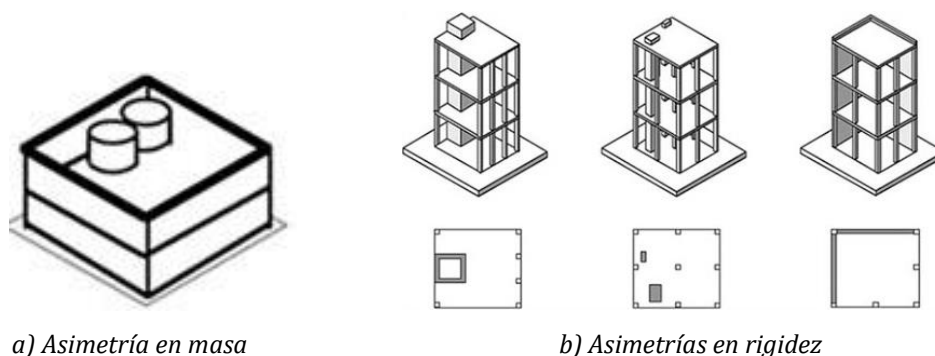


Figura 5.1 Ejemplo de estructuraciones con asimetrías en masa y en rigidez. Fuente: Google imágenes.

Los sismos inducen fuerzas de inercia en los centros de masa CM de los niveles de los edificios, lo cual provoca que aparezcan fuerzas cortantes en los centros de cortante de los entrepisos (CC). La resistencia de los entrepisos se puede concentrar en lo que se conoce como centro de torsión del entrepiso (CTe) que también tiene un lugar correspondiente en el nivel (CTn).

Para los fines del análisis sísmico, el Centro de Torsión (CT) de un edificio se define como el lugar geométrico en sus niveles o entrepisos en el cual se debe aplicar la fuerza o cortante sísmico, para que exista solo traslación (García, 2025). La no coincidencia de este punto con la del centro de cortante (en el entrepiso) o con el centro de masas (en el nivel) produce que un acoplamiento de vibraciones traslacionales y rotacionales del edificio.

Es necesario puntualizar que existe un CT en el nivel y uno en el entrepiso; al ser puntos distintos, debemos tener claro qué punto se está calculando para no confundir conceptos y obtener un cálculo erróneo. Lo mismo ocurre con el centro de masas (en el nivel) y el centro de cortante (en el entrepiso).

Análisis en el nivel y en el entrepiso

Para tener claros los conceptos antes mencionados se puede pensar en dos sistemas estáticamente equivalentes:

1. En los niveles: Las fuerzas de inercia (F) aplicadas en los centros de masa y el centro de torsión en el nivel (CTn). La distancia entre estos dos puntos será la excentricidad en el nivel y estas distancias multiplicadas por las fuerzas de inercia generan los momentos torsionantes en el nivel.
2. En los entrepisos: Las fuerzas cortantes (V) y el centro de torsión en el entrepiso (CTe), lo que genera momentos torsionantes en el entrepiso. La distancia entre estos dos puntos será la excentricidad en el entrepiso y estas distancias multiplicadas por las fuerzas cortantes generan los momentos torsionantes en el entrepiso.

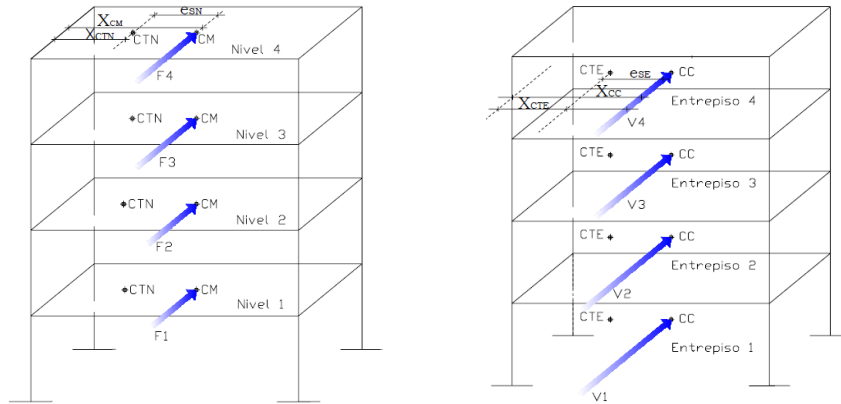


Figura 5.2 Sistemas estáticamente equivalentes: Nivel vs. Entrepiso (Cruz Cruz, 2009).

En la siguiente sección se detallará una metodología de cálculo de cada uno de estos lugares geométricos.

5.3.3. Cálculo del centro de torsión

Muchos autores tratan el tema de torsión sólo en planta, pero en realidad es un tema que se debería tratar de manera tridimensional. Existe una metodología matricial que permite realizar el cálculo de la localización del centro de torsión de edificios, el cual es aplicable solo si poseen diafragmas rígidos y planos verticales resistentes, sin importar la orientación en planta de estos (Alcocer, 1986).

Si el edificio posee diafragmas rígidos en los niveles, su comportamiento puede describirse mediante tres grados de libertad (u_i, v_i, θ_i). Si se consideran deformaciones pequeñas, se puede asumir que la deformación lateral, D_{ij} , que sufrirá un marco cualquiera j orientado según el ángulo β_i , será, Figura 5.3:

$$D_{ij} = u_i \cos \beta_i + v_i \sin \beta_i + r_j \theta_i$$

Donde:

$$r_j = x_j \sin \beta_j - y_j \cos \beta_j$$

Siendo $A(x_j, y_j)$ un punto cualquiera sobre el eje del marco proyectado en la planta del edificio.

La deducción de la distancia r_j es puramente geométrica y se puede apreciar en la Figura 5.4.

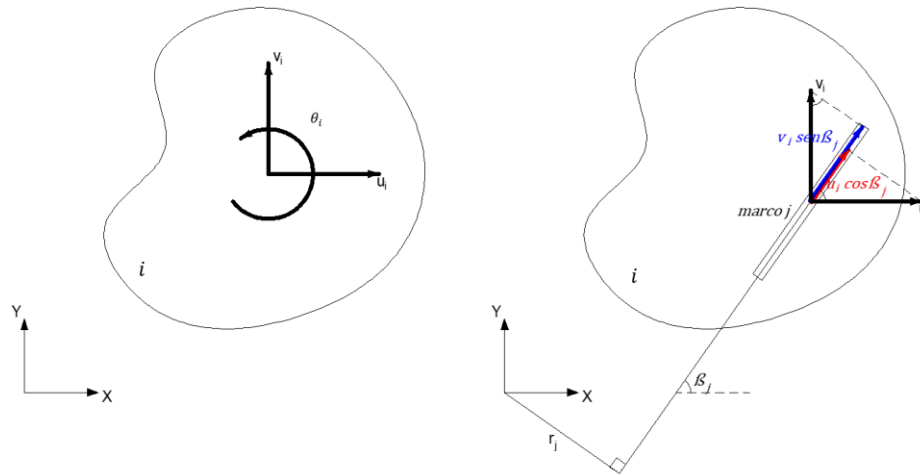


Figura 5.3 Diafragma i con sus grados de libertad y la proyección de estos en dirección del marco j para la configuración no deformada (Pérez-Pontón, 2020)

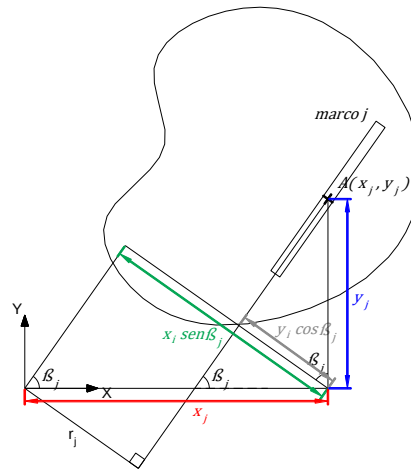


Figura 5.4 Deducción de r_j (Pérez-Pontón, 2020)

El método de rigideces establece que:

$$\{F\} = [K_G]\{d\}$$

Donde $\{d\}$ es el vector de desplazamientos en cada grado de libertad del edificio (3 por nivel), el vector $\{F\}$ contiene las fuerzas asociadas a cada grado de libertad y $[K_G]$ es la matriz de rigidez global de la estructura, es decir:

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XY} & K_{X\theta} \\ K_{YX} & K_{YY} & K_{Y\theta} \\ K_{\theta X} & K_{\theta Y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ \theta \end{bmatrix}$$

Donde:

$$[K_G] = \begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XY} & K_{X\theta} \\ K_{YX} & K_{YY} & K_{Y\theta} \\ K_{\theta X} & K_{\theta Y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma [K_{Dj}] \cos^2 \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] \cos \beta_j \sin \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] \cos \beta_j r_j \\ \Sigma [K_{Dj}] \sin \beta_j \cos \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] \sin^2 \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] \sin \beta_j r_j \\ \Sigma [K_{Dj}] r_j \cos \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] r_j \sin \beta_j & \Sigma [K_{Dj}] r_j^2 \end{bmatrix}$$

En los elementos de esta matriz, K_{Dj} es la matriz de rigidez lateral del marco j y β_j es el ángulo que proporciona la orientación del marco en planta.

La metodología para el cálculo del centro de torsión se basa en su definición, con lo que se debe localizar el lugar geométrico en el que, si es aplicado el perfil de cargas laterales, solo se generarán desplazamientos en traslación.

Para encontrar las coordenadas X del centro de torsión de cada nivel, se debe eliminar la rotación de los diafragmas y aplicar la fuerza en dirección Y:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ F_Y \\ M_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XY} & K_{X\theta} \\ K_{YX} & K_{YY} & K_{Y\theta} \\ K_{\theta X} & K_{\theta Y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 0 \end{bmatrix}$$

Los desplazamientos u y v generados por la fuerza F_Y se pueden calcular a partir de las primeras dos ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ F_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XY} \\ K_{YX} & K_{YY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

Conocidos u y v , los momentos necesarios para que los diafragmas no roten son proporcionados por la tercera ecuación.

$$[M_0] = [K_{\theta X} \quad K_{\theta Y}] \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

Conocidos estos momentos, las coordenadas de los puntos del centro de torsión del nivel i se calculan dividiendo los valores de momento entre la fuerza del nivel:

$$X_{CTNi} = \frac{M_{0i}}{F_{yi}}$$

Con un planteamiento similar, eliminando la rotación de los diafragmas y aplicando las fuerzas en la dirección X, se pueden calcular las coordenadas Y del centro de torsión en cada nivel:

$$Y_{CTNi} = \frac{M_{0i}}{F_{xi}}$$

Las coordenadas del centro de torsión en el entrepiso se pueden obtener utilizando estática, aplicando las siguientes expresiones:

$$X_{CTE_i} = \frac{\sum_{k=i}^{NN} F_{Y_k} X_{CTN_k}}{V_{y_i}} \quad y \quad Y_{CTE_i} = \frac{\sum_{k=i}^{NN} F_{X_k} Y_{CTN_k}}{V_{X_i}}$$

Con base en este procedimiento es posible utilizar programas comerciales de análisis estructural para determinar la localización del centro de torsión de un edificio. Para ello se realiza el análisis en cada dirección del edificio, impidiendo la torsión del edificio y obteniendo las coordenadas del centro de torsión de cada entrepiso dividiendo el momento total que se produce en el entrepiso entre la fuerza cortante correspondiente. Para pasar al nivel se emplea la estática.

5.3.1. Centro de masa y de cortante

Las coordenadas de los centros de masa del nivel “i” se pueden determinar por estática, obteniendo el primer momento de área de las “j” masas que conforman el nivel respecto a cada eje de cálculo y dividiendo estos resultados entre la masa total del nivel.

$$X_{CC_i} = \frac{\sum_{j=1}^{NM} M_j X_j}{\sum_{j=1}^{NM} M_j} \quad y \quad Y_{CC_i} = \frac{\sum_{j=1}^{NM} M_j Y_j}{\sum_{j=1}^{NM} M_j}$$

Las coordenadas del centro de cortante se pueden calcular conociendo la posición de los centros de masa de los niveles superiores y las fuerzas aplicadas en cada uno de ellos, las cuales generan la fuerza cortante en el entrepiso de interés. Con base en esto:

$$X_{CC_i} = \frac{\sum_{k=i}^{NN} F_{Y_k} X_{CM_k}}{V_{y_i}} \quad y \quad Y_{CC_i} = \frac{\sum_{k=i}^{NN} F_{X_k} Y_{CM_k}}{V_{X_i}}$$

5.3.2. Aspectos normativos

La Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo del 2023 (NTC-DS-2023) establece en el punto 2.3 “Efectos de torsión” lo siguiente, en donde se puede observar que, aún en las normas existe confusión entre la evaluación de la excentricidad estructural en el nivel y en el entrepiso.

La excentricidad torsional, e_s , calculada en cada entrepiso, debe tomarse como la distancia entre el centro de torsión del nivel correspondiente y la línea de acción de la fuerza lateral que actúa en él. Para fines de diseño, el momento torsionante debe tomarse, por lo menos, igual a la fuerza lateral que actúa en el nivel multiplicada por la excentricidad que para cada elemento vertical sismorresistente resulte más desfavorable de las siguientes:

$$1.5e_s + e_a$$

$$e_s - e_a$$

donde e_a es la excentricidad accidental en la dirección de análisis, medida perpendicularmente a la acción sísmica.

La excentricidad accidental, e_{ai} , en la dirección perpendicular a la de análisis en el i-ésimo entrepiso debe calcularse como sigue:

$$e_{ai} = \left[0.05 + 0.05 \left(\frac{i-1}{n-1} \right) \right] b_i$$

donde b_i es la dimensión del i-ésimo piso en la dirección perpendicular a la dirección de análisis; y n , el número de pisos del sistema estructural. Cuando las fuerzas sísmicas se aplican de manera concurrente en 2 direcciones ortogonales, la excentricidad accidental no necesita ser considerada de manera simultánea en ambas direcciones, sino que debe ser aplicada en la dirección que produce el mayor efecto.

Cuando el sistema estructural cuente con diafragmas de piso rígidos, el efecto de la torsión accidental puede ser considerado añadiendo a las fuerzas y desplazamientos que resulten de un análisis que no la considere, los efectos de un sistema de cargas que produzca un momento alojado en el plano de cada nivel de piso. El valor de cada uno de estos sistemas de carga se determinará de manera que produzca los momentos torsionantes de entrepiso que resultarían de considerar en cada dirección horizontal ortogonal la fuerza cortante de entrepiso multiplicada por la excentricidad accidental calculada con la ecuación correspondiente. Para este fin, se considerarán dos configuraciones de los momentos torsionantes debidos a las excentricidades accidentales, una en que todos los momentos adicionales se tomen con signo positivo y otra con signo negativo. Esta condición se cumple de acuerdo con lo siguiente:

$$M_{0i} = \pm (M_{ai} - M_{a(i+1)})$$

Donde M_{0i} es el momento aplicado en el plano del i-ésimo nivel, y $M_{ai} = (V_i \times e_{ai})$, en donde V_i es la fuerza cortante del i-ésimo entrepiso en la dirección del análisis, y e_{ai} su correspondiente excentricidad accidental de entrepiso, calculada de acuerdo con la ecuación 16.

Ningún elemento estructural podrá tener una resistencia menor que la necesaria para resistir la fuerza cortante que le corresponda sin tomar en cuenta la torsión accidental.

5.4. Materiales

Materiales:

1. Modelos físicos representativos de edificios de 3 niveles con y sin asimetría estructural.

5.5. Equipo

2. Mesa vibradora
3. Acelerómetros microelectromecánicos modelo ADXL203
4. Equipo de adquisición y procesamiento de datos con el que cuenta la mesa vibradora

5.6. Características de los modelos que se ensayarán

Se ensayarán dos modelos estructurales uno simétrico y el otro asimétrico en rigidez, Figura 5.5.



Figura 5.5 Modelos estructurales físicos de edificios de 3 niveles.

El modelo de 3 niveles simétrico tiene la configuración geométrica mostrada en la Figura 5.6. Cuenta con dimensiones en planta de 30x40cm, dos crujeas en dirección longitudinal y una crujía en dirección transversal.

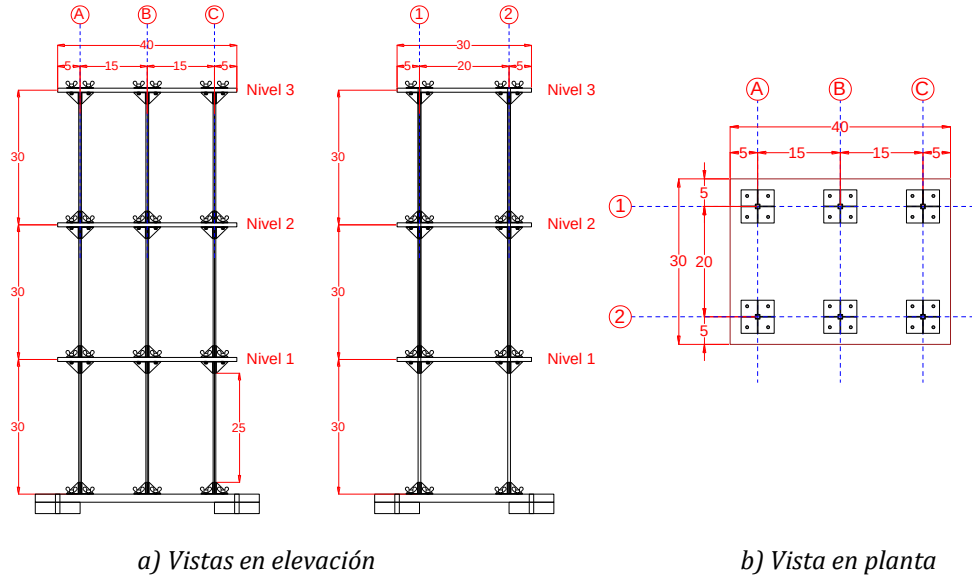


Figura 5.6 Configuración geométrica general de los modelos de 3 niveles. Dimensiones en cm.

Con el fin de proporcionar asimetría en rigidez se deben cambiar las columnas del eje A del otro modelo con cualquiera de las configuraciones de la

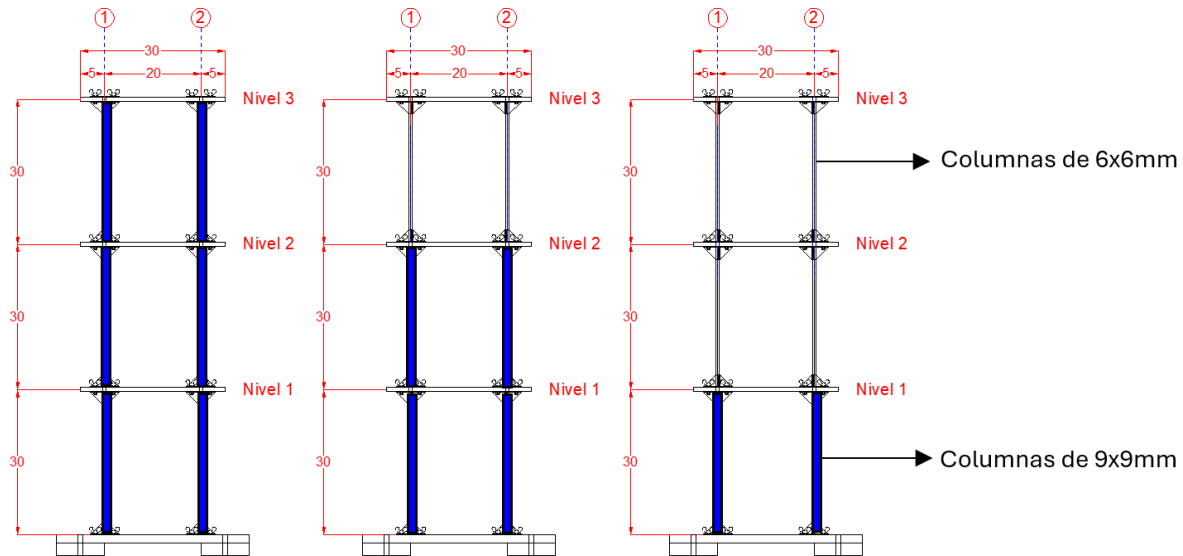


Figura 5.7 Posibles configuraciones del eje A para inducir la asimetría en rigidez

Las columnas del modelo están fabricadas con policarbonato sólido (lexán) y los sistemas de piso son de acrílico con las propiedades mecánicas presentadas en la tabla 1. El módulo de elasticidad del policarbonato se obtuvo en el laboratorio mediante una prueba de tensión, fig. 12, y las demás propiedades son las comerciales.

Tabla 5.1 Propiedades mecánicas de los materiales de las columnas y sistemas de piso del modelo

Elementos	Material	γ (kgf/m ³)	E (kgf/cm ²)	ν (1)
Columnas	Polycarbonato sólido	1200	25000	0.37
Losas	Acrílico	1190	31627	0.37

5.7. Desarrollo de la práctica

Actividad 1. Estimación experimental de los periodos de vibrar de los edificios.

Instrumentando la azotea de los modelos en tres puntos, uno en el centro de torsión y dos en forma excéntrica, se induce vibración libre en cada dirección y se observan los espectros de Fourier obtenidos en tiempo real con ayuda del software de control y adquisición con el que cuenta la mesa vibradora. Se solicita identificar las frecuencias asociadas a los nueve modos de vibrar del modelo de simétrico y las frecuencias de los primeros modos de vibrar de cada dirección del modelo asimétrico.

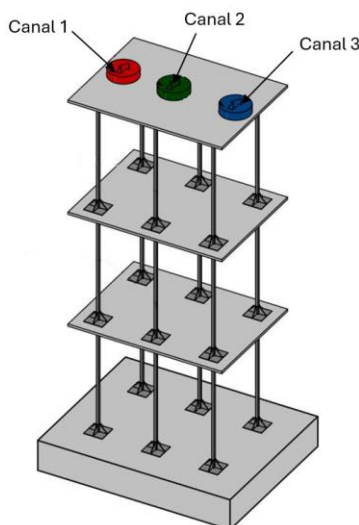


Figura 5.8 Instrumentación de los modelos para la obtención de propiedades dinámicas

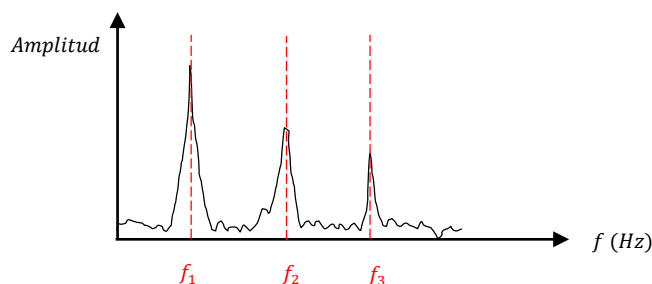


Figura 14. Ejemplo de espectro de Fourier de una señal

Tabla 5.2 Periodos de vibrar del modelo simétrico

Dirección	Modo	f (Hz)	$T = \frac{1}{f}$ (s)
Transversal	1		
	2		
	3		
Longitudinal	1		
	2		
	3		
Torsión	1		
	2		
	3		

Tabla 5.3 Periodos de vibrar del modelo asimétrico

Modo	Dirección	f (Hz)	$T = \frac{1}{f}$ (s)
1	Transversal		
2	Longitudinal		
3	Torsión		

Actividad 2. Cálculo de la excentricidad estructural

Determinar las coordenadas de los centros de masa y centros de torsión de los niveles, así como de los centros de cortante y centros de torsión de los entrepisos, escribiéndolas en las siguientes tablas y localizándolas en las figuras de abajo. La diferencia de coordenadas permite calcular la excentricidad estructural correspondiente.

Tabla 5.4 Cálculo de excentricidades estructurales en los niveles

Nivel	CM		CT		Excentricidad estructural en los niveles	
	X_{cm} (cm)	Y_{cm} (cm)	X_{ct} (cm)	Y_{ct} (cm)	esn_x (cm)	esn_y (cm)
1						
2						
3						

Tabla 5.5 Cálculo de excentricidades estructurales en los entrepisos

Entrepiso	CC		CTe		Excentricidad estructural en los entrepisos	
	X_{cc} (cm)	Y_{cc} (cm)	X_{cte} (cm)	Y_{cte} (cm)	ese_x (cm)	ese_y (cm)
1						
2						
3						

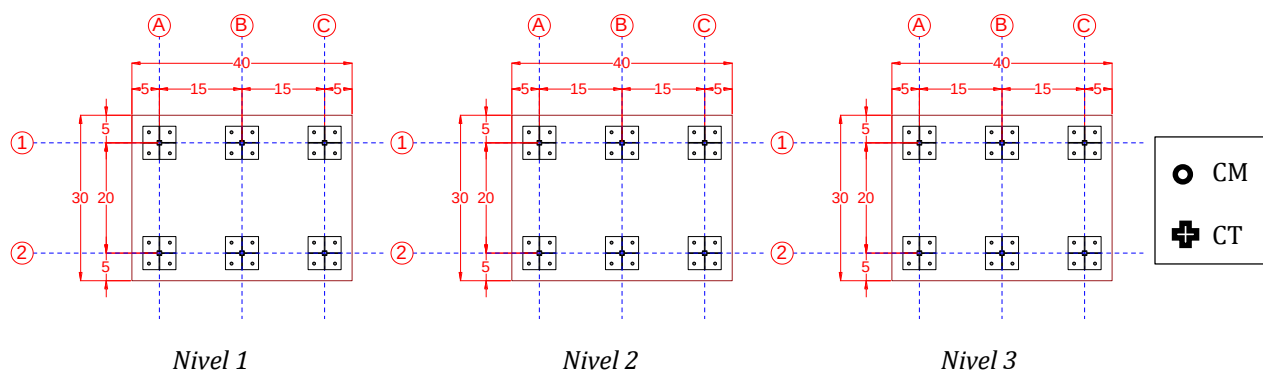


Figura 5.9 Localización del centro de masas y del centro de torsión de cada nivel

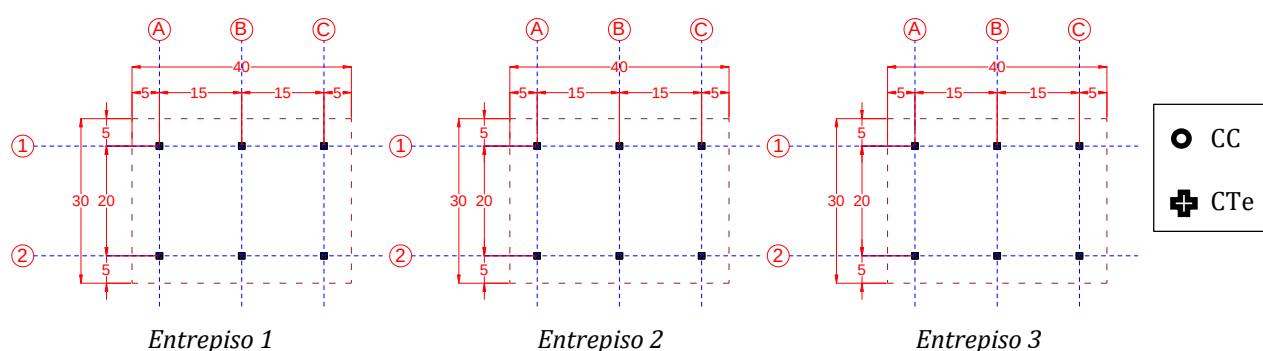


Figura 5.10 Localización del centro de cortante y del centro de torsión de cada entrepiso

Actividad 3. Ensayo de los modelos físicos en la mesa vibradora para observar su respuesta.

Con ayuda de la mesa vibradora se aplica un registro sísmico particular y se observará la respuesta estructural. Se espera que el alumno haga conclusiones respecto al comportamiento observado.

El registro sísmico por aplicar consiste en la componente EW del registro obtenido en la estación "GRANJAS" durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 escalado al 300% para inducir una respuesta claramente observable en el modelo.

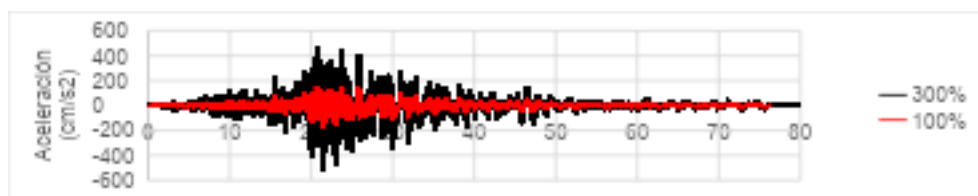


Figura 5.11 Aceleración del sismo 19092017-EW-GRANJAS y su escalado al 300%

Actividad 4. Comparación de respuestas analítica y experimental.

Se proporcionará al alumno los registros de aceleraciones obtenidos en el ensayo dinámico de la actividad 3 y el registro de la posición real de la mesa vibradora durante la prueba dinámica. Se solicita que desarrollen un modelo numérico en software comercial, que lo calibren con las propiedades dinámicas determinadas experimentalmente en la actividad 1 y que determinen la respuesta dinámica en términos de aceleración absoluta para que la comparen en los puntos de control correspondientes, Figura 5.8. Como excitación de entrada deberán emplear la aceleración real de la mesa vibradora, que deberán obtener derivando en dos ocasiones el registro de posición proporcionado.

5.8. Conclusiones y comentarios finales

Los alumnos reflexionan y redactan sus comentarios sobre los resultados obtenidos y su aplicación al análisis dinámico de estructuras.

5.9. Bibliografía

- Bazán, E., & Meli, R. (1985). Comportamiento sísmico de estructuras. Instituto de Ingeniería
- García, O. (2019) Apuntes de la asignatura Teoría general de las estructuras. Maestría en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo [NTC-Sismo]. (2020). Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 3 de diciembre de 2020
- Pérez-Pontón, J.A. (2020). Estudio del comportamiento dinámico torsional de un modelo físico, representativo de un edificio asimétrico de 3 niveles, empleando mesa vibradora [Tesis de maestría] Universidad Nacional Autónoma de México

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La práctica desarrollada fomenta un aprendizaje activo, crítico y reflexivo, y sienta las bases para que los estudiantes comprendan no solo el "cómo", sino el "porqué" del comportamiento estructural ante sismos. Desde el punto de vista pedagógico, la práctica permite que los estudiantes observen de manera tangible la relación entre los parámetros dinámicos frecuencia natural, amortiguamiento y modos de vibración y los efectos que estos tienen sobre la respuesta estructural.

La práctica propuesta demuestra que la integración entre modelos físicos, instrumentación experimental y análisis numérico constituye una herramienta pedagógica eficaz para la comprensión de los conceptos de dinámica estructural particularmente de temas complejos como la torsión sísmica.

Los ensayos realizados permitieron observar de manera clara cómo la asimetría en rigidez genera respuestas torsionales acopladas, con amplificaciones de respuesta en los lados flexibles de los edificios. Esto es clave para complementar la comprensión teórica de los estudiantes.

Se demostró que la localización y distribución vertical de la asimetría en rigidez (columnas robustas en diferentes entresijos) modifica significativamente la posición del centro de torsión y, en consecuencia, la respuesta dinámica global del edificio.

Tras la calibración, los modelos en ETABS reprodujeron con alta fidelidad (errores generalmente menores al 6%) las propiedades dinámicas y las respuestas sísmicas medidas experimentalmente, validando la confiabilidad de la metodología numérica cuando se ajusta con datos experimentales

En los modelos asimétricos se identificaron modos de vibración acoplados (traslación-torsión), incluyendo modos torsionales donde el lado rígido presentó amplitudes mayores que el flexible, un comportamiento contraintuitivo que fue posible visualizar experimentalmente.

El uso de acelerómetros MEM y el diseño de arreglos sensoriales específicos demostraron ser una herramienta efectiva y accesible para la caracterización dinámica de modelos a escala en un contexto docente.

Este trabajo aporta un material didáctico concreto que puede ser empleado por los docentes para el desarrollo de prácticas o visitas que muestren a los alumnos el comportamiento dinámico de estructuras. Esta contribución fortalece la labor docente e institucional de la Facultad de Ingeniería, enriqueciendo la formación académica de los estudiantes mediante herramientas experimentales innovadoras.

Queda un largo camino por recorrer en la labor docente universitaria. Es fundamental que todos los actores involucrados: sociedad, centros de trabajo, estudiantes, docentes e instituciones educativas, comprendan que la formación universitaria es un proceso que requiere tiempo y una visión compartida de innovación, que va más allá de simplemente preparar mano de obra capacitada.

Esta formación debe estar fundamentada en una visión analítica y crítica, capaz de identificar y corregir errores. Asimismo, debe entenderse que se necesita inversión en

infraestructura y, sobre todo, tiempo. La gran velocidad de la industria es incompatible no solo con los procesos burocráticos institucionales, sino también con la necesidad de un entendimiento profundo de las materias. Los estudiantes necesitan tiempo para reflexionar sobre la complejidad de los temas y requieren herramientas para transformar esa reflexión en comprensión práctica.

La presión social por acortar las carreras y acelerar la incorporación laboral resulta contraproducente, generando egresados que no solo carecen del conocimiento necesario, sino que internalizan conceptos erróneos sin desarrollar un pensamiento crítico.

La raíz de los problemas complejos no está en la inacción, sino en la falta de comprensión profunda de su origen. La complejidad de los problemas nacionales requiere una formación con alta capacidad de análisis, integral y humanista, donde los estudiantes no solo comprendan los problemas, sino que desarrollen el compromiso y la empatía para resolverlos con acciones concretas.

Se recomienda implementar la práctica de torsión sísmica dentro del curso Diseño Estructural de noveno semestre, integrando una evaluación formativa que mida su impacto en el aprendizaje.

También se sugiere extender el enfoque experimental a otros fenómenos estructurales, como la disipación de energía, fomentando una cultura de aprendizaje activo en ingeniería civil, así como promover la colaboración entre docentes e investigadores para continuar desarrollando recursos didácticos basados en la experimentación estructural.

REFERENCIAS

- Aguirre, J. C. (2023). *Enfoques pedagógicos contemporáneos y posmodernos: Propedéutica elemental para la cultura pedagógica*. Instituto Universitario Digital del Perú - INUDI. <https://editorial.inudi.edu.pe/>
- Bazán, E., & Meli, R. (1985). *Comportamiento sísmico de estructuras*. Instituto de Ingeniería UNAM.
- Brunner, J. J. (2009). La universidad, sus derechos e incierto futuro. *Revista Iberoamericana De Educación*, 49, 77–102. <https://doi.org/10.35362/rie490675>
- Chipol, A., & García, O. (2001). *Variación espacial del centro de torsión utilizando modelos de flexión para edificios de varios niveles con asimetría en planta y elevación*. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Comisión Federal de Electricidad [CFE]. (2020). *Manual de Diseño por Sismo*. México.
- Cruz Cruz, A. (2009). *Aspectos estructurales para caracterizar la respuesta sísmica dinámica de edificios torsionalmente acoplados* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Damy, J., & Alcocer, S. (1986). *Metodología matricial para el cálculo del centro de torsión en edificios*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- García, O. (2019). *Análisis sísmico estático de edificios asimétricos*. DEPMI, UNAM.
- Gatica-Saavedra, M., & Rubi-González, P. (2021). La clase magistral en el contexto del modelo educativo basado en competencias. *Educare*, *25*(1), 321-332. <https://doi.org/10.15359/ree.25-1.17>
- Iglesias-Soilán, M., Sánchez-San-José, I., Cano-Maganto, A., & Carretero-Peinado, C. (2024). Lección magistral interactiva: una metodología universitaria asequible y eficiente. *Revista Colombiana De Educación*, (90), 283–303. <https://doi.org/10.17227/rce.num90-15889>
- Labraña, Julio, & Brunner, José Joaquín. (2022). Transformación de la educación superior latinoamericana y su impacto en la idea de la universidad: Del acceso de élite a la masificación y universalización del acceso. *Perfiles educativos*, 44(176), 138-151. <https://doi.org/10.22201/iisue.24486167e.2022.176.60539>
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. (2023). *Test Specimen of a 10-Story Building on the E-Defense Shaking Table* [Imagen fotográfica]. Japan Science and Technology Agency (JST). <https://sj.jst.go.jp/stories/2023/s1011-01p.html>
- Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo [NTC-Sismo]. (2020). *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, 3 de diciembre de 2020.

- Ochoa Averos, S. R., Bizarreta Ortega, J. C., & Quevedo Sosa, L. (2018). Aparato didáctico para experimentos de licuación de suelos. En *Memorias del XXVII Congreso Nacional de Ingeniería Civil* (pp. 1-8). Lima, Perú. <https://dspace.unila.edu.br/server/api/core/bitstreams/563a8952-f5fc-4381-9d72-7000e91d7176/content>
- Peña, A. (2020). *Efectos de la torsión en edificios asimétricos*. UNAM.
- Peralta Alvarez, J. C., & Montiel Hernández, D. (2023). DESARROLLO DE UNA MESA VIBRADORA PARA LA SIMULACIÓN DE SISMOS. *INNOVA INGENIERÍA, PUBLICACIONES TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN*, 1(7), 13. Recuperado a partir de <https://innovaingenieria.uagro.mx/innova/index.php/innova/article/view/63>
- Pérez, R. (2017). *Introducción al diseño sísmico de estructuras asimétricas*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Pérez-Pontón, J. A. (2020). *Estudio del comportamiento dinámico torsional de un modelo estructural físico, representativo de un edificio asimétrico de 3 niveles, empleando mesa vibradora* [Tesis de maestría]. Facultad de Ingeniería de la UNAM: México.
- Quiroz, E. (2007). Competencias profesionales y calidad en la educación superior. *Reencuentro. Análisis De Problemas Universitarios*, (50), 93-99. <https://reencuentro.xoc.uam.mx/index.php/reencuentro/article/view/638>

ANEXOS

A1. Determinación de los centros de torsión de los modelos empleando el método matricial

A.1.1 Datos generales para los tres modelos.

Número de niveles: $NN := 3$

$t_{losa} := 0.6\text{m}$

Altura de entrepiso: $H_{\text{ent}} := 25\text{m}$

Número de marcos: $NM := 5$

Materiales: $\gamma_{\text{lex}} := 0.0012 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^3} = 1200 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$ $\gamma_{\text{acr}} := 0.00119 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^3} = 1190 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$ $E_{\text{lex}} := 25000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

Propiedades de las columnas:

$$b := 0.60\text{m} \quad h := 0.60\text{m} \quad A_{c6} := b \cdot h = 0.36 \cdot \text{m}^2 \quad I_{c6} := \frac{b \cdot h^3}{12} = 0.011 \text{m}^4$$

$$b_{\text{ent}} := 0.90\text{m} \quad h_{\text{ent}} := 0.90\text{m} \quad A_{c9} := b \cdot h = 0.81 \cdot \text{m}^2 \quad I_{c9} := \frac{b \cdot h^3}{12} = 0.055 \text{m}^4$$

Rigidez lateral de las columnas de 6 y 9mm:

$$k_{6x} := \frac{12 \cdot E_{\text{lex}} \cdot I_{c6}}{H^3} = 0.207 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$k_{9x} := \frac{12 \cdot E_{\text{lex}} \cdot I_{c9}}{H^3} = 1.05 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

Proporcionando un punto de cada marco:

$$P := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 15 & 0 \\ 30 & 0 \\ 0 & 20 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{cm}$$

Ángulos de los marcos en la vista en planta:

$$\beta := \begin{pmatrix} 90^\circ \\ 90^\circ \\ 90^\circ \\ 0^\circ \\ 0^\circ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.571 \\ 1.571 \\ 1.571 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Los cosenos directores de cada marco son:

$$u_x := \cos(\beta) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad u_y := \sin(\beta) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Las distancias del origen a la línea de acción de cada marco son:

$$r := \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..\text{length}(u_x) \\ \quad r_i \leftarrow P_{i,1} \cdot u_{y_i} + -P_{i,2} \cdot u_{x_i} \\ r \end{array} \quad r = \begin{pmatrix} 0 \\ 15 \\ 30 \\ -20 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

Determinación de fuerzas sísmicas:

Peso de los niveles:

$$w_1 := (0.40\text{m} \cdot 0.30\text{m} \cdot 0.006\text{m}) \cdot \gamma_{\text{acr}} + 0.067\text{kgf} \cdot 6 + (0.006\text{m} \cdot 0.006\text{m} \cdot 0.30\text{m}) \cdot \gamma_{\text{lex}} \cdot 6 = 1.33656\text{kgf}$$

$$w_2 := w_1$$

$$w_3 := (0.40\text{m} \cdot 0.30\text{m} \cdot 0.006\text{m}) \cdot \gamma_{\text{acr}} + 0.0563\text{kgf} \cdot 6 + (0.006\text{m} \cdot 0.006\text{m} \cdot 0.15\text{m}) \cdot \gamma_{\text{lex}} \cdot 6 = 1.235\text{kgf}$$

$$w = \begin{pmatrix} 1.337 \\ 1.337 \\ 1.235 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf} \quad W_T := \sum_{i=1}^{\text{length}(w)} w_i = 3.908\text{kgf}$$

Análisis estático:

$$F_n := \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..NN \\ \quad F_{n_i} \leftarrow C_s \cdot \frac{w_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^{NN} (w_i \cdot h_i)} \cdot \sum_{i=1}^{NN} w_i \\ F_n \end{array} \quad \underline{\underline{V}} := \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..NN \\ \quad V_j \leftarrow \sum_{i=j}^{NN} F_{n_i} \\ V \end{array}$$

$$F_n = \begin{pmatrix} 0.677 \\ 1.354 \\ 1.876 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf}$$

$$V = \begin{pmatrix} 3.908 \\ 3.231 \\ 1.876 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf}$$

Se supondrá el centro de masas en el centro geométrico del nivel:

$$\mathbf{X}_{\text{cm}} := \begin{pmatrix} 15 \\ 15 \\ 15 \end{pmatrix} \cdot \text{cm} \quad \mathbf{Y}_{\text{cm}} := \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$\mathbf{F} := \begin{pmatrix} F_{n_1} \\ F_{n_2} \\ F_{n_3} \\ F_{n_1} \\ F_{n_2} \\ F_{n_3} \\ F_{n_1} \cdot X_{\text{cm}_1} - F_{n_1} \cdot Y_{\text{cm}_1} \\ F_{n_2} \cdot X_{\text{cm}_2} - F_{n_2} \cdot Y_{\text{cm}_2} \\ F_{n_3} \cdot X_{\text{cm}_3} - F_{n_3} \cdot Y_{\text{cm}_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.677 \\ 1.354 \\ 1.876 \\ 0.677 \\ 1.354 \\ 1.876 \\ 3.386 \\ 6.771 \\ 9.382 \end{pmatrix}$$

Determinación de centros de cortante:

$$\mathbf{Y}_{\text{CC}} := \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..NN \\ \sum_{i=j}^{NN} (F_{n_i} \cdot Y_{\text{cm}_i}) \\ Y_{\text{CC}_j} \leftarrow \frac{\quad}{V_j} \\ Y_{\text{CC}} \end{array} \quad \mathbf{Y}_{\text{CC}} = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$\mathbf{X}_{\text{CC}} := \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..NN \\ \sum_{i=j}^{NN} (F_{n_i} \cdot X_{\text{cm}_i}) \\ X_{\text{CC}_j} \leftarrow \frac{\quad}{V_j} \\ X_{\text{CC}} \end{array} \quad \mathbf{X}_{\text{CC}} = \begin{pmatrix} 15 \\ 15 \\ 15 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

A.1.2 Modelo M1

Marcos en dirección X

$$KD_1 := \begin{pmatrix} 4 & -2 & 0 \\ -2 & 4 & -2 \\ 0 & -2 & 2 \end{pmatrix} \cdot k_{9x} = \begin{pmatrix} 4.199 & -2.1 & 0 \\ -2.1 & 4.199 & -2.1 \\ 0 & -2.1 & 2.1 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$KD_2 := \begin{pmatrix} 4 & -2 & 0 \\ -2 & 4 & -2 \\ 0 & -2 & 2 \end{pmatrix} \cdot k_{6x} = \begin{pmatrix} 0.829 & -0.415 & 0 \\ -0.415 & 0.829 & -0.415 \\ 0 & -0.415 & 0.415 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$KD_3 := KD_2$$

Marcos en dirección Y

$$KD_4 := \begin{bmatrix} 4 \cdot k_{6x} + 2 \cdot k_{9x} & -(2 \cdot k_{6x} + 1 \cdot k_{9x}) & 0 \\ -(2 \cdot k_{6x} + 1 \cdot k_{9x}) & 4 \cdot k_{6x} + 2 \cdot k_{9x} & -(2 \cdot k_{6x} + 1 \cdot k_{9x}) \\ 0 & -(2 \cdot k_{6x} + 1 \cdot k_{9x}) & 2 \cdot k_{6x} + 1 \cdot k_{9x} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 2.929 & -1.464 & 0 \\ -1.464 & 2.929 & -1.464 \\ 0 & -1.464 & 1.464 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$KD_5 := KD_4$$

Matriz de rigidez global

$$K_{xx} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{x_i})^2 \right] = \begin{pmatrix} 5.858 & -2.929 & 0 \\ -2.929 & 5.858 & -2.929 \\ 0 & -2.929 & 2.929 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$K_{xy} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{x_i} \cdot u_{y_i}) \right]$$

$$K_{x\theta} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{x_i} \cdot r_i) \right]$$

$$K_{yy} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{y_i})^2 \right] = \begin{pmatrix} 5.858 & -2.929 & 0 \\ -2.929 & 5.858 & -2.929 \\ 0 & -2.929 & 2.929 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$K_{\theta\theta} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (r_i)^2 \right] = \begin{pmatrix} 2104.704 & -1052.352 & 0 \\ -1052.352 & 2104.704 & -1052.352 \\ 0 & -1052.352 & 1052.352 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf} \cdot \text{cm}}{\text{rad}}$$

$$K_{y\theta} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{y_i} \cdot r_i) \right]$$

$$K_{yx} := K_{xy}^T$$

$$K_{\theta x} := K_{x\theta}^T$$

$$K_{\theta y} := K_{y\theta}^T$$

Ensamblando:

$$\underline{\underline{K}} := \begin{pmatrix} K_{xx.su} & K_{yx.su} & K_{\theta x.su} \\ K_{xy.su} & K_{yy.su} & K_{\theta y.su} \\ K_{x\theta.su} & K_{y\theta.su} & K_{\theta\theta.su} \end{pmatrix}$$
$$K = \begin{pmatrix} 5.858 & -2.929 & 0 & 0 & 0 & 0 & -58.579 & 29.29 & 0 \\ -2.929 & 5.858 & -2.929 & 0 & 0 & 0 & 29.29 & -58.579 & 29.29 \\ 0 & -2.929 & 2.929 & 0 & 0 & 0 & 0 & 29.29 & -29.29 \\ 0 & 0 & 0 & 5.858 & -2.929 & 0 & 37.325 & -18.662 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2.929 & 5.858 & -2.929 & -18.662 & 37.325 & -18.662 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2.929 & 2.929 & 0 & -18.662 & 18.662 \\ -58.579 & 29.29 & 0 & 37.325 & -18.662 & 0 & 2104.704 & -1052.352 & 0 \\ 29.29 & -58.579 & 29.29 & -18.662 & 37.325 & -18.662 & -1052.352 & 2104.704 & -1052.352 \\ 0 & 29.29 & -29.29 & 0 & -18.662 & 18.662 & 0 & -1052.352 & 1052.352 \end{pmatrix}$$

Obtención del centro de torsión

Sismo paralelo al eje X

$$\begin{pmatrix} F_x \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{yx} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad \text{donde:}$$

$$F_c := \text{stack}(F_x, 0) = \begin{pmatrix} 0.677 \\ 1.354 \\ 1.876 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf}$$

$$d := k_t^{-1} \cdot F_c = \begin{pmatrix} 1.334 \\ 2.437 \\ 3.078 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$u := \text{submatrix}(d, 1, 3, 1, 1) = \begin{pmatrix} 1.334 \\ 2.437 \\ 3.078 \end{pmatrix} \cdot \text{cm} \quad v := \text{submatrix}(d, 4, 6, 1, 1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$M_o := K_{x\theta} \cdot u + K_{y\theta} \cdot v = \begin{pmatrix} -6.771 \\ -13.542 \\ -18.765 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf} \cdot \text{cm}$$

$$Y_{CTn} := \frac{-M_o}{F_x} = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$Y_{CTe} := \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..NN \\ \quad \sum_{i=j}^{NN} (F_{n_i} \cdot Y_{CTn_i}) \\ Y_{CTe_j} \leftarrow \frac{\quad}{V_j} \\ Y_{CTe} \end{array} \quad Y_{CTe} = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

Sismo paralelo al eje Y

$$\begin{pmatrix} 0 \\ F_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{yx} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

$$F_c := \text{stack}(O, F_y) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.677 \\ 1.354 \\ 1.876 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf}$$

$$\underline{d} := \text{kt}^{-1} \cdot F_c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.334 \\ 2.437 \\ 3.078 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$u := \text{submatrix}(d, 1, 3, 1, 1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{cm} \quad v := \text{submatrix}(d, 4, 6, 1, 1) = \begin{pmatrix} 1.334 \\ 2.437 \\ 3.078 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$\underline{M_o} := K_{x\theta} \cdot u + K_{y\theta} \cdot v = \begin{pmatrix} 4.314 \\ 8.629 \\ 11.956 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf} \cdot \text{cm}$$

$$X_{CTn} := \frac{M_o}{F_y} = \begin{pmatrix} 6.372 \\ 6.372 \\ 6.372 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

En los entrepisos:

$$X_{CTe} := \begin{array}{|l} \text{for } j \in 1..NN \\ \sum_{i=j}^{NN} (F_{n_i} \cdot X_{CTn_i}) \\ X_{CTe_j} \leftarrow \frac{\quad}{V_j} \\ X_{CTe} \end{array} \quad X_{CTe} = \begin{pmatrix} 6.372 \\ 6.372 \\ 6.372 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

A.1.3 Modelo M2

Marcos en dirección X

$$KD_1 := \begin{bmatrix} 4 \cdot k_{9x} & -(2 \cdot k_{9x}) & 0 \\ -(2 \cdot k_{9x}) & 2 \cdot k_{9x} + 2 \cdot k_{6x} & -(2 \cdot k_{6x}) \\ 0 & -(2 \cdot k_{6x}) & 2 \cdot k_{6x} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 4.199 & -2.1 & 0 \\ -2.1 & 2.514 & -0.415 \\ 0 & -0.415 & 0.415 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$KD_2 := \begin{pmatrix} 4 & -2 & 0 \\ -2 & 4 & -2 \\ 0 & -2 & 2 \end{pmatrix} \cdot k_{6x} = \begin{pmatrix} 0.829 & -0.415 & 0 \\ -0.415 & 0.829 & -0.415 \\ 0 & -0.415 & 0.415 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$KD_3 := KD_2$$

Marcos en dirección Y

$$KD_4 := \begin{bmatrix} 4 \cdot k_{6x} + 2 \cdot k_{9x} & -(2 \cdot k_{6x} + 1 \cdot k_{9x}) & 0 \\ -(2 \cdot k_{6x} + 1 \cdot k_{9x}) & 5 \cdot k_{6x} + 1 \cdot k_{9x} & -(3 \cdot k_{6x}) \\ 0 & -(3 \cdot k_{6x}) & 3 \cdot k_{6x} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 2.929 & -1.464 & 0 \\ -1.464 & 2.087 & -0.622 \\ 0 & -0.622 & 0.622 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$KD_5 := KD_4$$

Matriz de rigidez global

$$K_{xx} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{x_i})^2 \right] = \begin{pmatrix} 5.858 & -2.929 & 0 \\ -2.929 & 4.173 & -1.244 \\ 0 & -1.244 & 1.244 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$K_{xy} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{x_i} \cdot u_{y_i}) \right]$$

$$K_{x\theta} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{x_i} \cdot r_i) \right]$$

$$K_{yy} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{y_i})^2 \right] = \begin{pmatrix} 5.858 & -2.929 & 0 \\ -2.929 & 4.173 & -1.244 \\ 0 & -1.244 & 1.244 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$K_{\theta\theta} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (r_i)^2 \right] = \begin{pmatrix} 2104.704 & -1052.352 & 0 \\ -1052.352 & 1767.744 & -715.392 \\ 0 & -715.392 & 715.392 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf} \cdot \text{cm}}{\text{rad}}$$

$$K_{y\theta} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{y_i} \cdot r_i) \right]$$

$$K_{yx} := K_{xy}^T$$

$$K_{\theta x} := K_{x\theta}^T$$

$$K_{\theta y} := K_{y\theta}^T$$

$$K = \begin{pmatrix} 5.858 & -2.929 & 0 & 0 & 0 & 0 & -58.579 & 29.29 & 0 \\ -2.929 & 4.173 & -1.244 & 0 & 0 & 0 & 29.29 & -41.731 & 12.442 \\ 0 & -1.244 & 1.244 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12.442 & -12.442 \\ 0 & 0 & 0 & 5.858 & -2.929 & 0 & 37.325 & -18.662 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2.929 & 4.173 & -1.244 & -18.662 & 37.325 & -18.662 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.244 & 1.244 & 0 & -18.662 & 18.662 \\ -58.579 & 29.29 & 0 & 37.325 & -18.662 & 0 & 2104.704 & -1052.352 & 0 \\ 29.29 & -41.731 & 12.442 & -18.662 & 37.325 & -18.662 & -1052.352 & 1767.744 & -715.392 \\ 0 & 12.442 & -12.442 & 0 & -18.662 & 18.662 & 0 & -715.392 & 715.392 \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{x2} \\ F_{x3} \\ F_{x1} \\ F_{x2} \\ F_{x3} \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix}$$

Obtención del centro de torsión

Sismo paralelo al eje X

$$\begin{pmatrix} F_x \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{yx} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad \text{donde:}$$

$$F_c := \text{stack}(F_x, 0) = \begin{pmatrix} 0.677 \\ 1.354 \\ 1.876 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf}$$

$$d := k_t^{-1} \cdot F_c = \begin{pmatrix} 1.334 \\ 2.437 \\ 3.945 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$u := \text{submatrix}(d, 1, 3, 1, 1) = \begin{pmatrix} 1.334 \\ 2.437 \\ 3.945 \end{pmatrix} \cdot \text{cm} \quad v := \text{submatrix}(d, 4, 6, 1, 1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$M_o := K_{x\theta} \cdot u + K_{y\theta} \cdot v = \begin{pmatrix} -6.771 \\ -13.542 \\ -18.765 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf} \cdot \text{cm}$$

$$Y_{CTn} := \frac{-M_o}{F_x} = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$Y_{CTe} := \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..NN \\ \quad \sum_{i=j}^{NN} (F_{n_i} \cdot Y_{CTn_i}) \\ Y_{CTe_j} \leftarrow \frac{\quad}{V_j} \\ Y_{CTe} \end{array} \quad Y_{CTe} = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

Sismo paralelo al eje Y

$$\begin{pmatrix} 0 \\ F_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{yx} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

$$F_c := \text{stack}(O, F_y) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.677 \\ 1.354 \\ 1.876 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf}$$

$$\underline{d} := \text{kt}^{-1} \cdot F_c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.334 \\ 2.437 \\ 3.945 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$u := \text{submatrix}(d, 1, 3, 1, 1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$v := \text{submatrix}(d, 4, 6, 1, 1) = \begin{pmatrix} 1.334 \\ 2.437 \\ 3.945 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$\underline{M_o} := K_{x\theta} \cdot u + K_{y\theta} \cdot v = \begin{pmatrix} 4.314 \\ -7.562 \\ 28.147 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf} \cdot \text{cm}$$

$$X_{CTn} := \frac{M_o}{F_y} = \begin{pmatrix} 6.372 \\ -5.584 \\ 15 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

En los entrepisos:

$$X_{CTe} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..NN \\ \sum_{i=j}^{NN} (F_{n_i} \cdot X_{CTn_i}) \\ X_{CTe_j} \leftarrow \frac{\quad}{V_j} \\ X_{CTe} \end{cases}$$

$$X_{CTe} = \begin{pmatrix} 6.372 \\ 6.372 \\ 15 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

A.1.4 Modelo M3

Marcos en dirección X

$$KD_1 := \begin{bmatrix} 2 \cdot k_{9x} + 2 \cdot k_{6x} & -(2 \cdot k_{6y}) & 0 \\ -(2 \cdot k_{6y}) & 4 \cdot k_{6x} & -(2 \cdot k_{6y}) \\ 0 & -(2 \cdot k_{6y}) & 2 \cdot k_{6x} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 2.514 & -0.415 & 0 \\ -0.415 & 0.829 & -0.415 \\ 0 & -0.415 & 0.415 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$KD_2 := \begin{pmatrix} 4 & -2 & 0 \\ -2 & 4 & -2 \\ 0 & -2 & 2 \end{pmatrix} \cdot k_{6x} = \begin{pmatrix} 0.829 & -0.415 & 0 \\ -0.415 & 0.829 & -0.415 \\ 0 & -0.415 & 0.415 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$KD_3 := KD_2$$

Marcos en dirección Y

$$KD_4 := \begin{bmatrix} 5 \cdot k_{6x} + 1 \cdot k_{9x} & -(3 \cdot k_{6y}) & 0 \\ -(3 \cdot k_{6y}) & 6 \cdot k_{6x} & -(3 \cdot k_{6y}) \\ 0 & -(3 \cdot k_{6y}) & 3 \cdot k_{6x} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 2.087 & -0.622 & 0 \\ -0.622 & 1.244 & -0.622 \\ 0 & -0.622 & 0.622 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$KD_5 := KD_4$$

Matriz de rigidez global

$$K_{xx} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{x_i})^2 \right] = \begin{pmatrix} 4.173 & -1.244 & 0 \\ -1.244 & 2.488 & -1.244 \\ 0 & -1.244 & 1.244 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$K_{xy} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{x_i} \cdot u_{y_i}) \right]$$

$$K_{x\theta} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{x_i} \cdot r_i) \right]$$

$$K_{yy} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{y_i})^2 \right] = \begin{pmatrix} 4.173 & -1.244 & 0 \\ -1.244 & 2.488 & -1.244 \\ 0 & -1.244 & 1.244 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$K_{\theta\theta} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (r_i)^2 \right] = \begin{pmatrix} 1767.744 & -715.392 & 0 \\ -715.392 & 1430.784 & -715.392 \\ 0 & -715.392 & 715.392 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf} \cdot \text{cm}}{\text{rad}}$$

$$K_{y\theta} := \sum_{i=1}^{NM} \left[KD_i \cdot (u_{y_i} \cdot r_i) \right]$$

$$K_{yx} := K_{xy}^T$$

$$K_{\theta x} := K_{x\theta}^T$$

$$K_{\theta y} := K_{y\theta}^T$$

$$K = \begin{pmatrix} 4.173 & -1.244 & 0 & 0 & 0 & 0 & -41.731 & 12.442 & 0 \\ -1.244 & 2.488 & -1.244 & 0 & 0 & 0 & 12.442 & -24.883 & 12.442 \\ 0 & -1.244 & 1.244 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12.442 & -12.442 \\ 0 & 0 & 0 & 4.173 & -1.244 & 0 & 37.325 & -18.662 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.244 & 2.488 & -1.244 & -18.662 & 37.325 & -18.662 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.244 & 1.244 & 0 & -18.662 & 18.662 \\ -41.731 & 12.442 & 0 & 37.325 & -18.662 & 0 & 1767.744 & -715.392 & 0 \\ 12.442 & -24.883 & 12.442 & -18.662 & 37.325 & -18.662 & -715.392 & 1430.784 & -715.392 \\ 0 & 12.442 & -12.442 & 0 & -18.662 & 18.662 & 0 & -715.392 & 715.392 \end{pmatrix}$$

Obtención del centro de torsión

Sismo paralelo al eje X

$$\begin{pmatrix} F_x \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{yx} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad \text{donde:}$$

$$F_c := \text{stack}(F_x, 0) = \begin{pmatrix} 0.677 \\ 1.354 \\ 1.876 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf}$$

$$d := k_t^{-1} \cdot F_c = \begin{pmatrix} 1.334 \\ 3.931 \\ 5.439 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$u := \text{submatrix}(d, 1, 3, 1, 1) = \begin{pmatrix} 1.334 \\ 3.931 \\ 5.439 \end{pmatrix} \cdot \text{cm} \quad v := \text{submatrix}(d, 4, 6, 1, 1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$M_o := K_{x\theta} \cdot u + K_{y\theta} \cdot v = \begin{pmatrix} -6.771 \\ -13.542 \\ -18.765 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf} \cdot \text{cm}$$

$$Y_{CTn} := \frac{-M_o}{F_x} = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$Y_{CTe} := \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..NN \\ \sum_{i=j}^{NN} (F_{n_i} \cdot Y_{CTn_i}) \\ Y_{CTe_j} \leftarrow \frac{\quad}{V_j} \\ Y_{CTe} \end{array} \quad Y_{CTe} = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

Sismo paralelo al eje Y

$$\begin{pmatrix} 0 \\ F_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{yx} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

$$F_c := \text{stack}(O, F_y) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.677 \\ 1.354 \\ 1.876 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf}$$

$$\underline{\underline{d}} := k t^{-1} \cdot F_c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.334 \\ 3.931 \\ 5.439 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$u := \text{submatrix}(d, 1, 3, 1, 1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$v := \text{submatrix}(d, 4, 6, 1, 1) = \begin{pmatrix} 1.334 \\ 3.931 \\ 5.439 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$\underline{\underline{M_o}} := K_{x0} \cdot u + K_{y0} \cdot v = \begin{pmatrix} -23.561 \\ 20.313 \\ 28.147 \end{pmatrix} \cdot \text{kgf} \cdot \text{cm}$$

$$X_{CTn} := \frac{M_o}{F_y} = \begin{pmatrix} -34.797 \\ 15 \\ 15 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

En los entrepisos:

$$X_{CTe} := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..NN \\ \sum_{i=j}^{NN} (F_{n_i} \cdot X_{CTn_i}) \\ X_{CTe_j} \leftarrow \frac{\quad}{V_j} \\ X_{CTe} \end{array} \right.$$

$$X_{CTe} = \begin{pmatrix} 6.372 \\ 15 \\ 15 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$