



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

**Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción
Departamento de Ingeniería Civil**

TESIS

Determinación de la Necesidad de Análisis Dinámico en
Losas de Vigueta y Bovedilla debido al paso de personas.

PRESENTA

Ing. Roberto Carlos Contreras González

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIDAD EN ESTRUCTURAS**

TUTOR:

M. en Ing. Daniel Enrique Reyna Valdivia

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORAL

Dr. Mario Eduardo Zermeño de León

M. en Ing. Gaspar Hermenegildo Vela Martínez

Aguascalientes, Ags. Diciembre 2025

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CARTA DE VOTO APROBATORIO

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **DIRECTOR** designado del estudiante **ROBERTO CARLOS CONTRERAS GONZÁLEZ** con ID 218543 quien realizó la tesis titulada: **DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD DE ANÁLISIS DINÁMICO EN LOSAS DE VIGUETA Y BOVEDILLA DEBIDO AL PASO DE PERSONAS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en la fracción IX del Artículo 43 del Reglamento General de Posgrados, doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 1 de diciembre de 2025.

M. en Ing. Daniel Enrique Reyna Valdivia
Director

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CARTA DE VOTO APROBATORIO

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T E

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **ROBERTO CARLOS CONTRERAS GONZÁLEZ** con ID 218543 quien realizó la tesis titulada: **DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD DE ANÁLISIS DINÁMICO EN LOSAS DE VIGUETA Y BOVEDILLA DEBIDO AL PASO DE PERSONAS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en la fracción IX del Artículo 43 del Reglamento General de Posgrados, doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
“Se Lumen Proferre”
Aguascalientes, Ags., a 1 de diciembre de 2025.


M. en E. Gaspar Hermenegildo Vela Martínez
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CARTA DE VOTO APROBATORIO

MTRA. EN ING AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T E

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **ROBERTO CARLOS CONTRERAS GONZÁLEZ** con ID 218543 quien realizó la tesis titulada: **DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD DE ANÁLISIS DINÁMICO EN LOSAS DE VIGUETA Y BOVEDILLA DEBIDO AL PASO DE PERSONAS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en la fracción IX del Artículo 43 del Reglamento General de Posgrados, doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 1 de diciembre de 2025.

Dr. Mario Eduardo Zermeño de León
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA
PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación (dd/mm/aaaa): 1/12/2025

NOMBRE: Roberto Carlos Contreras González

ID 218543

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería Civil

LGAC (del posgrado): Estructuras y Construcción

MODALIDAD DEL PROYECTO DE GRADO: Tesis (X)

*Tesis por artículos científicos ()

**Tesis por Patente ()

Trabajo Práctico ()

TÍTULO: Determinación de la necesidad de análisis dinámico en lasos de vigueta y bovedilla debido al paso de personas.

El proyecto mejora la seguridad y el confort en viviendas de interés social al ofrecer criterios prácticos que permiten evaluar y controlar vibraciones en losas de manera eficiente, optimizando recursos y fortaleciendo la calidad del diseño estructural.

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado):

INDICAR SEGÚN CORRESPONDA: SI, NO, NA (No Aplica)

Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:	
<u>SI.</u>	El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
<u>NA.</u>	La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
<u>SI.</u>	Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
<u>SI.</u>	Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
<u>SI.</u>	Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
<u>NA.</u>	El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
<u>SI.</u>	Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
<u>SI.</u>	Generó transferencia del conocimiento o tecnológico
<u>SI.</u>	Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
El egresado cumple con lo siguiente:	
<u>SI.</u>	Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Posgrados
<u>SI.</u>	Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc.)
<u>SI.</u>	Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial
<u>NA.</u>	Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario (En caso de que corresponda)
<u>SI.</u>	Coincide con el título y objetivo registrado
<u>SI.</u>	Tiene congruencia con cuerpos académicos
<u>SI.</u>	Tiene el CVU de la SECHITI actualizado
<u>NA.</u>	Tiene el o los artículos aceptados o publicados y cumple con los requisitos institucionales (en caso de que proceda)
*En caso de Tesis por artículos científicos publicados (completar solo si la tesis fue por artículos)	
<u>NA.</u>	Aceptación o Publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto según el nivel del programa
<u>NA.</u>	El (la) estudiante es el primer autor(a)
<u>NA.</u>	El (la) autor(a) de correspondencia es el Director (a) del Núcleo Académico
<u>NA.</u>	En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
<u>NA.</u>	Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
**En caso de Tesis por Patente	
<u>NA.</u>	Cuenta con la evidencia de solicitud de patente en el Departamento de Investigación (anexarla al presente formato)

Con base en estos criterios, se autoriza continuar con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Si No

Elaboró:

FIRMAS
DR. MIGUEL ÁNGEL SOTO ZAMORA
DR. MARIO EDUARDO ZERMENO DE LEÓN

*NOMBRE Y FIRMA DEL(LA) CONSEJERO(A) SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCION:

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NA de la LGAC correspondiente distinto al director o miembro del comité tutorial, asignado ante el Decano.

NOMBRE Y FIRMA DEL COORDINADOR DE POSGRADO:

DR. MARIO EDUARDO ZERMENO DE LEÓN

DR. MARIO ERNESTO ESPARZA DÍAZ DE LEÓN

Revisó:

DR. MARIO ERNESTO ESPARZA DÍAZ DE LEÓN

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

MTRA. EN/ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Note: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado
En cumplimiento con el Art. 24 fracción V del Reglamento General de Posgrado, que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: Proponer criterios y mecanismos de selección, permanencia, egreso y titulación de estudiantes para asegurar la eficiencia terminal y la titulación y el Art. 28 fracción IX, atender, asesorar y dar el seguimiento del estudiantado desde su ingreso hasta su titulación.

Elaborado por: D. Apoyo al Posgrado

Revisado por: D. Control Escolar/D. Gestión de Calidad

Aprobado por: D. Control Escolar / D. Apoyo al Posgrado

Código: DO-SEE-FO-15

Actualización: 02

Emisión: 12/08/25

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por su constante apoyo durante mi formación académica, así como al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la beca otorgada durante parte de mi maestría, que contribuyó al avance y desarrollo de mis estudios.

Deseo expresar un reconocimiento muy especial al M. en Ing. Daniel Reyna, mi tutor, por su invaluable guía, paciencia y apoyo constante a lo largo de toda la elaboración de esta tesis. Gracias por su experiencia, dedicación y, sobre todo, por creer en mí; su confianza y motivación fueron fundamentales para el desarrollo y la culminación de este trabajo.

Asimismo, agradezco al Mtro. Gaspar Vela por sus valiosos comentarios y apoyo académico, y al Dr. Zermeño por su participación en calidad de asesor.

Agradezco también a mi amiga Shirley, por su constante apoyo, motivación y ayuda durante los momentos más difíciles del proceso.

Finalmente, agradezco a mi familia y amigos, por su constante apoyo, comprensión y motivación durante todo el proceso de esta maestría, así como a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron a la realización de esta investigación. Cada apoyo, consejo o palabra de aliento dejó una huella importante en este proyecto y en mi formación personal y profesional.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mis padres, Angélica y Roberto. A mi mamá, por su amor incondicional, su ternura y comprensión, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por darme siempre la fuerza y el cariño para seguir adelante. A mi papá, por su paciencia y disposición a acompañarme a su manera; gracias a ambos, he podido avanzar sobre una base de amor y confianza que me permitió alcanzar este logro.

A mis hermanas, Yoy, por sus palabras de ánimo y por siempre creer en mí, y Ñeñe, por ayudarme a mantener el rumbo y avanzar; cada una, con su propia manera de estar presente, se convirtió en un pilar de apoyo que me guio y me animó a no rendirme.

Dedico este trabajo a mí mismo, por no rendirme ante las dudas, por aprender de cada tropiezo y cada caída, por cada esfuerzo, cada madrugada de estudio y cada obstáculo superado. Que este logro sea un recordatorio de que *tu fuerza no está en el poder, sino en el coraje de soñar* (HK).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Índice General

Índice General.....	1
Índice de tablas.....	5
Índice de ilustraciones.....	7
Resumen	9
Abstract.....	10
CAPITULO I. Introducción	12
1.1 Definición del problema.....	12
1.2 Objetivo general.....	13
1.3 Objetivos particulares.....	13
1.4 Alcances.....	14
1.4.1 Límites del Estudio:.....	14
1.4.2 Criterios de Análisis:.....	14
1.4.3 Posibles Expansiones Futuras:.....	15
1.5 Justificación	15
1.6 Hipótesis.....	16
CAPITULO II. Marco Teórico	18
2.1 Descripción del sistema de losa de vigueta y bovedilla.....	18
2.1.1 Definición y características de las losas de vigueta y bovedilla	18
2.1.2 Tipos de losas y sistemas constructivos	18
2.2 Conceptos fundamentales de dinámica estructural	19
2.2.1 Frecuencia natural y modos de vibración.....	19
2.2.2 Efecto de la excitación dinámica por cargas humanas.....	20
2.2.3 Método de excitación de losas	22
2.2.4 Amortiguamiento.....	23
2.2.5 Módulo de elasticidad dinámico del concreto	23
CAPITULO III. Revisión del Estado del Arte.....	25
3.1 Estudios sobre vibraciones inducidas por personas en losas	25
3.2 Estimación del amortiguamiento estructural	26
3.3 Módulo de elasticidad dinámico.....	29

3.4 Normas y criterios de aceptación de vibraciones.....	29
3.4.1 Normativas mexicanas.....	29
3.4.2 Normativas internacionales.....	30
CAPITULO IV. Metodología.....	34
4.1 Tipo de investigación	34
4.2 Enfoque de la investigación.....	35
4.3 Diseño de la investigación.....	35
4.4 Población y muestra.....	35
4.5 Equipos de medición	36
4.6 Software utilizado	36
4.6.1 Software de procesamiento de datos	36
4.6.2 Software de análisis y modelado estructural.....	37
4.6.3 Software de visualización y procesamiento de datos	38
4.7 Procedimiento experimental	38
4.7.1 Registro de características estructurales	39
4.7.2 Posición de acelerómetros	39
4.7.3 Calibración y validación de equipos	40
4.7.4 Excitación de las losas	40
4.8 Desarrollo del modelo numérico	40
4.9 Tratamiento y análisis preliminar de datos.....	40
4.9.1 Procesamiento de señales	41
4.9.2 Cálculo de parámetros dinámicos	41
4.9.3 Corrección de posibles desviaciones.....	41
4.10 Validación de modelos numéricos.....	42
4.11 Supuestos y limitaciones metodológicas	42
CAPITULO V. Campaña experimental	45
5.1 Descripción general de la campaña.....	45
5.2 Inspección y preparación inicial	45
5.2.1 Inspección Previa y Levantamiento de Características Estructurales.....	46
5.2.2 Preparación del Área de Estudio.....	48
5.2.3 Instalación de Equipos y Verificación de Condiciones de Medición	48

5.3 Desarrollo de las pruebas	50
CAPITULO VI. Análisis numérico	52
6.1 Descripción general del proceso de análisis.....	52
6.2 Procesamiento de datos experimentales.....	52
6.2.1 Organización y Validación de Datos Obtenidos en Campo.....	52
6.2.2 Procesamiento de los datos en el software Degtra	54
6.3 Obtención del porcentaje de amortiguamiento	55
6.4 Construcción de Modelos Numéricos.....	56
6.4.1 Geometría del modelo	57
6.4.2 Tipo de modelación:	57
6.4.3 Propiedades de los materiales:.....	59
6.4.4 Condiciones de apoyo y conexiones estructurales:.....	61
6.4.5 Discretización de la malla:	62
6.5 Parametrización del Modelo.....	64
6.5.1 Definición de los Casos de Carga	64
6.5.2 Análisis Modal	65
6.6 Calibración y validación del modelo.....	66
6.7 Generación de nuevos modelos.....	67
6.7.1 Metodología de generación	67
6.8 Evaluación de la vibración en losas.....	68
6.9 Representación gráfica de la frontera de vibración.....	70
6.9.1 Generación de matriz de vibraciones.....	70
6.9.2 Visualización de la frontera de vibración.....	70
6.9.3 Comparación de fronteras según tipo de concreto.....	71
CAPITULO VII. Resultados y Discusiones.....	73
7.1 Resultados experimentales.....	73
7.1.1 Frecuencias naturales	73
7.1.2 Porcentaje de amortiguamiento	74
7.1.3 Observaciones generales	75
7.2 Resultados del análisis numérico	76
7.2.1 Resultados del análisis modal	76

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

7.2.2 Resultados de los nuevos modelos generados	77
7.2.3 Evaluación de vibraciones de acuerdo a AISC	78
7.2.4 Representación de la frontera de vibración.....	81
7.2.5 Frontera de vibración variando el amortiguamiento	83
7.3 Discusión general de resultados	87
CAPITULO VIII. Conclusiones	90
8.1 Conclusión general.....	90
8.2 Conclusiones particulares	90
8.2 Recomendaciones.....	92
Bibliografía	93
ANEXO A. FORMULAS PARA CÁLCULO DE FACTOR DE SENSIBILIDAD K DE ACUERDO A (NTC CDMX, 2023).....	95
ANEXO B. Ficha técnica del acelerómetro WT901BLECL5.0	96
ANEXO C. Manual de calibración de acelerómetro WT901BLECL5.0.....	97
ANEXO D. Manual para registro de aceleraciones del WT901BLECL5.0	101
ANEXO E. Registro fotográfico de mediciones	103
ANEXO F. Lecturas de aceleración registradas.....	104
ANEXO G. Parámetros de modelación	107
ANEXO H. Materiales de modelación.....	110
ANEXO I. Especificaciones de casos de carga	115
ANEXO J. Especificaciones de análisis modal.....	116
ANEXO K. Algunos ejemplos de modelos numéricos desarrollados	117
ANEXO L. Tablas y matrices de análisis dinámico con variación de amortiguamiento	120
ANEXO M. Código Python para generación de mapas de calor.....	126

Índice de tablas

Tabla II.1 Tipos representativos de actividad humana. (Bachmann et al., 1995).....	20
Tabla III.1 Componentes para cálculo de amortiguamiento (European Commission, 2006)	27
Tabla III.2 Componentes para cálculo de amortiguamiento (HiVoSS, 2008).....	28
Tabla III.3 Valores de amortiguamiento recomendados en guías de diseño recopilados por (Nguyen, 2013)	28
Tabla III.4 Relaciones de amortiguamiento crítico para varios tipos de pisos (Smith et al., 2009).....	28
Tabla III.5 Rangos de percepción humana de acuerdo a parámetro K adaptado de (NTC CDMX, 2023).....	31
Tabla III.6 Valores recomendados de parámetros para la fórmula AISC de vibraciones de pisos.....	32
Tabla V.1 Geometría general de las losas medidas en campo	46
Tabla V.2 Espesor de las losas medidas en campo.....	46
Tabla V.3 Materiales identificados en mediciones de campo	47
Tabla VI.1 Presentación de documento generado por acelerómetro	53
Tabla VI.2 Características de los elementos estructurales utilizados en el modelo numérico	59
Tabla VI.3 Propiedades de la mampostería utilizada en los modelos numéricos	60
Tabla VI.4 Propiedades del concreto clase 1A utilizado en los modelos numéricos.....	60
Tabla VI.5 Propiedades del concreto clase 2 utilizado en los modelos numéricos.....	60
Tabla VI.6 Dimensiones de los elementos estructurales basados en las condiciones medidas en campo	63
Tabla VI.7 Distribución de la malla para cada componente estructural.....	63
Tabla VI.8 Sobrecarga muerta considerada en el modelo estructural.....	64
Tabla VI.9 Sobrecarga viva considerada en el modelo estructural.....	65
Tabla VI.10 Valores recomendados de parámetros para la fórmula AISC de vibraciones de pisos.....	69
Tabla VII.1 Frecuencias experimentales registradas.....	73
Tabla VII.2 Porcentaje de amortiguamiento de losas	74
Tabla VII.3 Comparación de frecuencias naturales: experimental vs. modelo numérico.....	77
<i>Tabla VII.4 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al., (2003), para un concreto clase 1A $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$</i>	79
Tabla VII.5 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003) para un concreto clase 2 $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$	80
Tabla VII.6 Matriz de límites de confort de confort de acuerdo a (Murray et al., 2003), para un concreto clase 1A $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$	81
Tabla VII.7 Matriz de límites de confort de confort de acuerdo a (Murray et al., 2003), para un concreto clase 2 $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$	81

Tabla A. 1 Especificaciones técnicas del módulo WT901BLECL5.0.....	96
Tabla A. 2 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 1A ($f'c = 250\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=4\%$	120
Tabla A. 3 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 1A ($f'c = 250\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=5\%$	121
Tabla A. 4 Matriz de límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 1A ($f'c=250\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=4\%$	122
Tabla A. 5 Matriz de límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 1A ($f'c=250\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=5\%$	122
Tabla A. 6 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 2 ($f'c = 200\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=4\%$	123
Tabla A. 7 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 2 ($f'c = 200\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=5\%$	124
Tabla A. 8 Matriz de límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 2 ($f'c=200\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=4\%$	125
Tabla A. 9 Matriz de límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 2 ($f'c=250\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=5\%$	125

Índice de ilustraciones

Figura II.1 Respuesta de un sistema de baja frecuencia ante una excitación periódica (Smith et al., 2009)	21
Figura II.2 Respuesta de un sistema de baja frecuencia ante una excitación periódica (Smith et al., 2009)	22
Figura III.1 Límites de exposición a vibraciones según la NOM-024-STPS-2001 (Secretaría del Trabajo y Previsión Social 2001).	31
Figura III.2 Límite de percepción de vibración adaptado de (BS 6472, 2008)	31
Figura III.3 Aceleraciones pico recomendadas para el confort humano adoptado de (Murray et al., 2003)	32
Figura V.1 Geometría de la sección transversal de las viguetas medidas en campo	47
Figura V.2 Instalación y calibración de acelerómetro en losa	49
Figura VI.1 Acelerograma de losa sometida a vibración mediante caminata, medido en campo	53
Figura VI.2 Acelerograma de losa sometida a vibración mediante impacto (Heel-drop), medido en campo	54
Figura VI.3 Disposición de elementos estructurales en módulo de SAP2000	62
Figura VI.4 Geometría general de la estructura y nomenclatura de caras	63
Figura VI.5 Obtención de la frecuencia natural del modelo de SAP 2000	66
Figura VII.1 Comparación del espectro de respuesta de Fourier de losas medidas en campo	73
Figura VII.2 Acelerograma y amortiguamiento esperado de losa 1	74
Figura VII.3 Acelerograma y amortiguamiento esperado de losa 2	75
Figura VII.4 Acelerograma y amortiguamiento esperado de losa 3	75
Figura VII.5 Variación de la frecuencia natural de la losa según su geometría	77
Figura VII.6 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 1A ($f'c = 250\text{kg/cm}^2$)	82
Figura VII.7 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 2 ($f'c = 200\text{kg/cm}^2$)	82
Figura VII.8 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 1A ($f'c = 250\text{kg/cm}^2$) y $\beta=4\%$	84
Figura VII.9 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 1A ($f'c = 250\text{kg/cm}^2$) y $\beta=5\%$	84
Figura VII.10 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 2 ($f'c = 200\text{kg/cm}^2$) y $\beta=4\%$	85
Figura VII.11 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 2 ($f'c = 200\text{kg/cm}^2$) y $\beta=5\%$	85
Figura VII.12 Fronteras de comportamiento dinámico para concreto clase A1 ($E_c = 14'000\sqrt{f'c}$), para diferentes porcentajes de amortiguamiento	86

Figura VII.13 Fronteras de comportamiento dinámico para concreto clase 2 ($E_c = 8'000\sqrt{f'_c}$), para diferentes porcentajes de amortiguamiento	86
Figura A. 1. Módulo acelerómetro triaxial WT901BLECL5.0 de WitMotion.	96
Figura A. 2 Registro fotográfico de mediciones realizadas a inmueble.....	103
Figura A. 3Documento de aceleraciones registrada por acelerómetro Wit Motion	104
Figura A. 4 Datos brutos obtenidos con el acelerómetro durante la prueba de vibración	105
Figura A. 5 Señales filtradas y espectros de amplitud de Fourier correspondientes a cada acelerograma.....	106
Figura A. 6Parámetros de modelación de muros de mampostería.....	107
Figura A. 7 Parámetros de modelación de capa de compresión.....	107
Figura A. 8 Parámetros de modelación de muros de mampostería de viguetas de concreto	108
Figura A. 9 Parámetros de modelación de muros de mampostería de vínculos rígidos....	109
Figura A. 10 Parámetros de modelación del material tabique rojo recocido	110
Figura A. 11 Parámetros de modelación del material Concreto clase A1 $f'_c = 250\text{kg/cm}^2$	111
Figura A. 12 Parámetros de modelación del material concreto clase 1A ($f'_c=250\text{kg/cm}^2$) con módulo de elasticidad dinámico	112
Figura A. 13 Parámetros de modelación del material concreto clase 2 ($f'_c = 200\text{kg/cm}^2$)	113
Figura A. 14 Parámetros de modelación del material concreto clase 2 ($f'_c=200\text{kg/cm}^2$) con módulo de elasticidad dinámico.....	114
Figura A. 15 Caso de carga para el estado de carga muerta (DL).....	115
Figura A. 16 Caso de carga para el estado de carga viva (LL).....	115
Figura A. 17 Parámetros de modelación del análisis modal.....	116

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo establecer criterios para determinar cuándo es necesario realizar un análisis dinámico en losas de vigueta y bovedilla en viviendas de tipo medio y de interés social, a partir de mediciones experimentales y modelos numéricos. Utilizando el método heel-drop, se realizaron mediciones de aceleración en losas de concreto, con el fin de obtener datos sobre las respuestas dinámicas y las frecuencias naturales. A partir de estos datos experimentales de campo, se desarrolló un modelo numérico que replica el comportamiento dinámico de las losas, calibrándolos con los resultados obtenidos en campo. Con esto, se generaron nuevos modelos variando las dimensiones en planta de las losas y el tipo de concreto para analizar su impacto en las frecuencias naturales.

Con los resultados obtenidos de los modelos, se calculó la aceleración máxima de cada configuración para verificar si la losa alcanzaría niveles de vibración aceptables, utilizando los criterios establecidos en la Guía 11 del AISC. Estos cálculos fueron usados para generar matrices en función de las dimensiones de la losa y el tipo de concreto, permitiendo crear mapas de calor que visualizaron las combinaciones críticas. Como resultado, se desarrolló una guía gráfica práctica que facilita la toma de decisiones sobre la necesidad de realizar un análisis dinámico detallado. Esta guía será útil para el diseño estructural, permitiendo mejorar la evaluación de las losas frente a vibraciones en proyectos de ingeniería civil. El estudio contribuye a una mejor comprensión de los factores que afectan el comportamiento dinámico de las losas y proporciona criterios prácticos para su evaluación en el diseño estructural de viviendas de tipo medio y de interés social.

Abstract

The present study aims to establish criteria for determining when a dynamic analysis is necessary for joist and vaulted slabs in mid-range and social housing, based on experimental measurements and numerical models. Using the heel-drop method, acceleration measurements were taken on concrete slabs to gather data on dynamic responses and natural frequencies. Based on these experimental data, numerical models were developed to replicate the dynamic behavior of the slabs, calibrating them with the field results. Additionally, new models were developed by varying the slab geometry and the concrete's modulus of elasticity to analyze their impact on the natural frequencies.

With the results obtained from the models, the maximum acceleration for each configuration was calculated to verify if the slab would reach acceptable vibration levels, using the criteria established in AISC Design Guide 11. These calculations were used to generate matrices depending on the slab dimensions and the concrete type, allowing for the creation of heat maps to visualize critical combinations. As a result, a practical graphical guide was developed to support decision-making regarding the need for detailed dynamic analysis. This guide will be useful for optimizing structural design and improving the evaluation of slabs' response to vibration in civil engineering projects. The study contributes to a better understanding of the factors affecting the dynamic behavior of slabs and provides practical criteria for their analysis in the structural design of social housing.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



CAPITULO I:



INTRODUCCIÓN

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPITULO I. Introducción

1.1 Definición del problema

En la ingeniería civil, las losas de vigueta y bovedilla son ampliamente utilizadas en la construcción de viviendas por su resistencia, eficiencia y facilidad de montaje. Sin embargo, estas losas pueden experimentar vibraciones excesivas cuando son sometidas a cargas dinámicas, como el tránsito de personas lo que puede generar incomodidad para los ocupantes e incluso afectar la seguridad estructural en casos extremos. A pesar de su relevancia, el comportamiento dinámico de este tipo de losas ha recibido relativamente poca atención en los métodos tradicionales de diseño.

Los métodos de cálculo actuales para el análisis dinámico de losas suelen ser complejos, requieren conocimientos avanzados y prolongan los tiempos de diseño. o suelen considerar simplificaciones en sus criterios de cálculo, lo que conlleva a un diseño estructural más conservador como es el caso actual de las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México (NTC CDMX, 2023), donde se idealiza el modelo como una viga simplemente apoyada. Estos aspectos limitan su aplicación práctica en proyectos de vivienda de tipo medio y de interés social, donde se busca un equilibrio entre seguridad, confort y eficiencia en el diseño estructural. La ausencia de criterios claros para determinar cuándo es necesario un análisis dinámico representa una brecha en la práctica profesional.

Por lo tanto, surge la necesidad de establecer criterios prácticos y accesibles que permitan identificar cuándo una losa de vigueta y bovedilla requiere un análisis dinámico, de manera que se pueda garantizar el confort de los usuarios y la seguridad de la estructura. Esta investigación propone desarrollar dichos criterios a partir de mediciones experimentales y modelos numéricos, ofreciendo una guía que apoye la toma de decisiones en el diseño estructural de las losas.

1.2 Objetivo general

Desarrollar criterios, a partir de mediciones experimentales en campo y modelos numéricos, que permitan determinar cuándo es necesario realizar un análisis dinámico de losas de vigueta y bovedilla en viviendas de tipo medio y de interés social. Estos criterios se establecerán de acuerdo con las normativas del AISC y se representarán en forma de una guía gráfica aplicable al diseño estructural.

1.3 Objetivos particulares

- a) Realizar mediciones experimentales en campo, de la aceleración en losas de vigueta y bovedilla utilizando el método heel-drop, con el fin de obtener datos cuantitativos de la respuesta dinámica de estas estructuras.
- b) Desarrollar un modelo numérico de las losas, basado en las características geométricas y propiedades de los materiales observados en las mediciones experimentales.
- c) Calibrar el modelo numérico con los datos experimentales obtenidos, verificando su precisión y fiabilidad en la predicción de la respuesta dinámica.
- d) Generar nuevos modelos numéricos a partir del modelo calibrado, variando la geometría de las losas y el tipo de concreto, para analizar cómo estos factores influyen en las frecuencias naturales y la respuesta dinámica.
- e) Proponer una guía gráfica que, en función de las dimensiones de la losa y del tipo de concreto, indique cuándo es necesario realizar un análisis dinámico detallado y cuándo puede omitirse.

1.4 Alcances

1.4.1 Límites del Estudio:

El estudio se limitará a las losas de vigueta y bovedilla de poliestireno empleadas en edificaciones residenciales de tipo medio y de interés social, sometidas a cargas dinámicas generadas por el tránsito peatonal. Se excluirán las vibraciones de tipo armónico, las de origen sísmico y las cargas excepcionales producidas por maquinaria pesada o fenómenos naturales. Las mediciones en campo se realizarán únicamente en edificaciones ubicadas en el estado de Aguascalientes. El criterio de selección de las edificaciones será la representatividad en cuanto a su geometría y de sus condiciones estructurales representativas (incluyendo tipos de materiales y sistema constructivo), con el objetivo de obtener un panorama representativo de las vibraciones generadas por la actividad humana. Para la medición de las respuestas dinámicas de las losas, se utilizarán acelerómetros, cuyas especificaciones técnicas y capacidades de medición se detallarán en el capítulo de Metodología.

1.4.2 Criterios de Análisis:

El estudio se enfocará en identificar las condiciones bajo las cuales resulta necesario realizar un análisis dinámico en losas de vigueta y bovedilla utilizadas en viviendas de tipo medio y de interés social. Para ello, se establecerán criterios basados en los resultados experimentales y numéricos obtenidos, considerando tanto las características geométricas de las losas como las propiedades mecánicas de los materiales.

Se emplearán modelos numéricos calibrados con mediciones experimentales, a fin de evaluar la respuesta dinámica de las losas. Los resultados permitirán definir parámetros límite y desarrollar una guía gráfica que sirva como

herramienta práctica para la toma de decisiones en el diseño estructural, facilitando la identificación de los casos en que el análisis dinámico detallado es requerido.

1.4.3 Posibles Expansiones Futuras:

Una posible línea de expansión podría enfocarse en analizar losas con diferentes secciones geométricas de vigueta y espesores de la capa de compresión, con el objetivo de evaluar cómo estas variaciones influyen en la rigidez estructural y en las frecuencias naturales del sistema. Asimismo, podría explorarse la influencia de distintas condiciones de apoyo, tales como apoyos empotrados o con continuidad entre claros, para determinar su efecto sobre la respuesta dinámica de la losa.

Otro aspecto que podría considerarse es la interacción suelo–estructura, ya que el comportamiento dinámico del terreno puede modificar las características vibratorias del sistema, especialmente en edificaciones de baja rigidez o cimentaciones superficiales. Finalmente, también resultaría de interés ampliar el estudio hacia otros tipos de losas prefabricadas o materiales aligerantes, lo que permitiría comparar su desempeño dinámico frente al sistema analizado en este trabajo.

1.5 Justificación

El diseño de losas de vigueta y bovedilla sujetas a vibraciones es un aspecto crucial en la ingeniería estructural, y resulta especialmente relevante en el contexto mexicano, donde este sistema es uno de los más utilizados en la construcción de edificaciones. A pesar de su uso generalizado, existe una escasa cantidad de información técnica accesible y aplicada sobre cómo evaluar adecuadamente su

comportamiento ante cargas dinámicas, como las generadas por el paso de personas.

El análisis dinámico es, por naturaleza, complejo y requiere conocimientos avanzados en modelado estructural, lo cual representa una barrera para su aplicación en proyectos cotidianos, particularmente en obras de pequeña y mediana escala o con recursos limitados. Esta situación ha llevado a que muchos ingenieros estructurales omitan el análisis dinámico durante el proceso de diseño, generando incertidumbre sobre el desempeño vibracional de estas losas y, en algunos casos, afectando el confort y la seguridad de los ocupantes.

Ante esta problemática, la presente investigación busca establecer criterios, con base en resultados experimentales y modelos numéricos, que permitan determinar de manera objetiva cuándo es necesario realizar un análisis dinámico en losas de vigueta y bovedilla utilizadas en viviendas de tipo medio y de interés social.

Como producto de este estudio se propone una guía gráfica, que servirá como herramienta práctica para apoyar el proceso de diseño estructural, facilitando la toma de decisiones y brindando a los ingenieros una referencia clara sobre cuándo es pertinente realizar un análisis dinámico. Con ello, se pretende contribuir a una práctica estructural más rigurosa y eficiente, reduciendo la dependencia de decisiones empíricas y fortaleciendo la seguridad y el confort de las edificaciones.

1.6 Hipótesis

La respuesta dinámica de las losas de vigueta y bovedilla ante cargas peatonales puede caracterizarse mediante mediciones experimentales y modelos numéricos, lo que permite establecer criterios prácticos que orienten a los diseñadores estructurales sobre cuándo es necesario realizar un análisis dinámico detallado, conforme a los estándares establecidos por el AISC.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



CAPITULO II:



MARCO TEÓRICO

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPITULO II. Marco Teórico

2.1 Descripción del sistema de losa de vigueta y bovedilla

2.1.1 Definición y características de las losas de vigueta y bovedilla

Las losas de vigueta y bovedilla son elementos estructurales utilizados en la construcción de edificios residenciales y comerciales, caracterizadas por la combinación de viguetas prefabricadas y bovedillas (huecos o bloques de relleno) que conforman la superficie de la losa. Estas losas permiten cubrir amplios claros sin la necesidad de cimbras extensas, disminuyendo el peso propio de la estructura y optimizando el uso de materiales.

- Materiales comunes: concreto armado, viguetas pretensadas, bovedillas de concreto, poliestireno expandido o arcilla cocida.
- Aplicaciones: viviendas de tipo medio y de interés social.

Las características estructurales de las losas de vigueta y bovedilla, como la resistencia del concreto, la geometría de las viguetas y el tipo de bovedillas, influyen de manera directa en el comportamiento dinámico de la estructura.

2.1.2 Tipos de losas y sistemas constructivos

Existen diversos tipos de losas de vigueta y bovedilla, que se diferencian por la forma de las viguetas, la disposición de las bovedillas y el tipo de pretensado o armado del concreto. Este sistema estructural se completa con una capa de compresión, una losa delgada de concreto colada en sitio, con un espesor generalmente entre 4 y 5 cm, que se coloca sobre las bovedillas y viguetas para integrar todos los elementos en un conjunto monolítico. Esta capa mejora la rigidez y la capacidad para distribuir las cargas, además de favorecer el trabajo conjunto entre las viguetas y el concreto vertido.

A continuación, se describen los principales componentes que conforman este tipo de sistema:

- Viguetas pretensadas: fabricadas con tensado previo de los cables de acero, permiten claros mayores y reducen deformaciones.
- Viguetas de alma abierta: están prefabricadas con un patín inferior colado y el alma abierta, cuentan con armadura superior preparada para integrarse fácilmente con la capa de compresión vertida en obra.
- Bovedillas: pueden ser de concreto, arcilla cocida o poliestireno; actúan como cimbra perdida y contribuyen a reducir el peso de la losa.

2.2 Conceptos fundamentales de dinámica estructural

En el estudio del comportamiento de las losas frente a cargas dinámicas, es fundamental comprender los conceptos básicos de dinámica estructural, ya que permiten evaluar y predecir la respuesta de la estructura ante excitaciones externas, como las producidas por el tránsito de personas.

2.2.1 Frecuencia natural y modos de vibración

Toda losa posee frecuencias naturales de vibración, determinadas por sus propiedades geométricas y mecánicas, como el módulo de elasticidad del material, la densidad, el espesor, las condiciones de apoyo y la rigidez. Cada frecuencia natural está asociada a un modo de vibración, que describe la forma característica en que la losa se deforma durante la vibración. El fenómeno de resonancia, ocurren cuando la frecuencia de la excitación coincide con alguna frecuencia natural de la losa, provocando amplificación de desplazamientos y aceleraciones.

2.2.2 Efecto de la excitación dinámica por cargas humanas

La percepción humana de las vibraciones varía según el nivel de actividad de las personas. Los individuos que permanecen sentados o acostados tienden a ser más sensibles a las vibraciones que aquellos que se encuentran de pie o en movimiento. En consecuencia, los criterios de confort y las normas de tolerancia a la vibración difieren según el tipo de espacio o actividad, estableciéndose estándares más estrictos para lugares como oficinas, viviendas e iglesias que para entornos donde las personas están en movimiento, como centros comerciales o pasarelas peatonales (Mast, 2001)

Para analizar las fuerzas dinámicas generadas por actividades humanas, es importante primero clasificar los tipos de movimiento. La Tabla II.1 presenta los tipos representativos de actividad que se consideran en estudios de vibraciones inducidas por humanos y sus respectivos rangos de frecuencia de cada actividad.

Representative types of activity			Range of applicability		
Designation	Definition	Design activity rate [Hz]	Actual activities	Activity rate [Hz]	Structure type
“walking”	walking with continuous ground contact	1.6 to 2.4	<ul style="list-style-type: none"> slow walking (ambling) normal walking fast, brisk walking 	~ 1.7 ~ 2.0 ~ 2.3	<ul style="list-style-type: none"> pedestrian structures (pedestrian bridges, stairs, piers, etc.) office buildings, etc.
“running”	running with discontinuous ground contact	2.0 to 3.5	<ul style="list-style-type: none"> slow running (jog) normal running fast running (sprint) 	~ 2.1 ~ 2.5 > 3.0	<ul style="list-style-type: none"> pedestrian bridges on jogging tracks, etc.
“jumping”	normal to high rhythmical jumping on the spot with simultaneous ground contact of both feet	1.8 to 3.4	<ul style="list-style-type: none"> fitness training with jumping, skipping and running to rhythmical music jazz dance training 	~ 1.5 to 3.4 ~ 1.8 to 3.5	<ul style="list-style-type: none"> gymnasia, sport halls gymnastic training rooms
“dancing”	approximately equivalent to “brisk walking”	1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> social events with classical and modern dancing (e.g. English Waltz, Rumba etc.) 	~ 1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> dance halls concert halls and other community halls without fixed seating
“hand clapping with body bouncing while standing”	rhythmical hand clapping in front of one’s chest or above the head while bouncing vertically by forward and backward knee movement of about 50 mm	1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> pop concerts with enthusiastic audience 	~ 1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> concert halls and spectator galleries with and without fixed seating and “hard” pop concerts
“hand clapping”	rhythmical hand clapping in front of one’s chest	1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> classical concerts, “soft” pop concerts 	~ 1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> concert halls with fixed seating (no “hard” pop concerts)
“lateral body swaying”	rhythmical lateral body swaying while being seated or standing	0.4 to 0.7	<ul style="list-style-type: none"> concerts, social events 		<ul style="list-style-type: none"> spectator galleries

Table G.1: Representative types of activities and their applicability to different actual activities and types of structures

Tabla II.1 Tipos representativos de actividad humana. (Bachmann et al., 1995)

La respuesta de un sistema sometido a una excitación periódica puede descomponerse en dos partes fundamentales: la respuesta transitoria y la respuesta en estado estacionario. La respuesta en estado estacionario corresponde al comportamiento del sistema una vez que las oscilaciones iniciales han desaparecido y el sistema alcanza un régimen estable. En contraste, la respuesta transitoria describe el comportamiento inicial del sistema, antes de llegar a ese estado estable.

La Figura II.1 ilustra cómo responde típicamente una señal en estructuras de frecuencia natural baja, las primeras oscilaciones corresponden al régimen transitorio, mientras que las últimas ondas, cuando el sistema ya se ha estabilizado, representan el estado estacionario. Dependiendo de las características del sistema, la magnitud del régimen transitorio puede ser menor o mayor que la del estado estacionario.

Cuando la frecuencia natural de la estructura o del sistema es significativamente mayor que la frecuencia de excitación, la respuesta en estado estacionario resulta despreciable frente a la transitoria. En estos casos, la excitación actúa más como una serie de impulsos que como una fuerza continua Figura II.2.

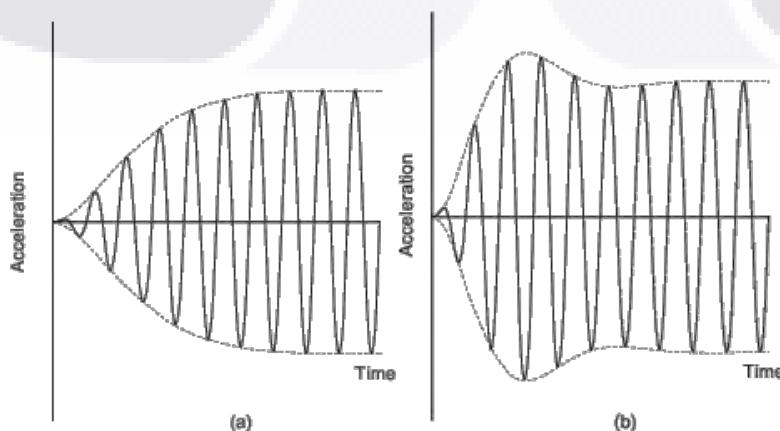


Figura II.1 Respuesta de un sistema de baja frecuencia ante una excitación periódica (Smith et al., 2009)

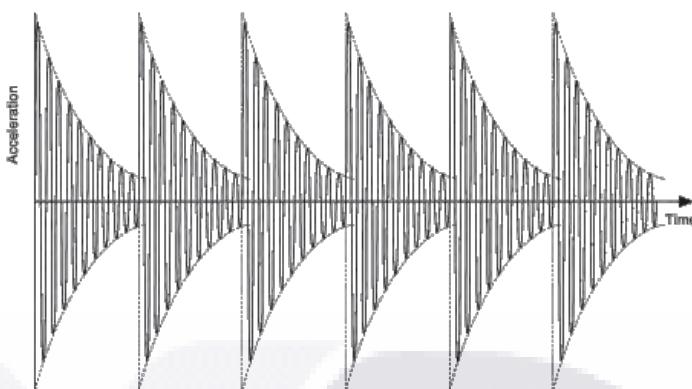


Figura II.2 Respuesta de un sistema de baja frecuencia ante una excitación periódica (Smith et al., 2009)

2.2.3 Método de excitación de losas

Bachmann et al. (1995) propuso el uso del método de heel-drop como una técnica práctica para estimar el amortiguamiento in situ, permitiendo obtener valores más representativos de las condiciones reales de servicio. Este método consiste en que una persona de aproximadamente 700 N se eleva sobre las puntas de los pies hasta levantar los talones y luego los deja caer de forma súbita sobre la superficie del piso. Este método puede emplearse tanto como herramienta de diseño como para la evaluación de pisos existentes frente a vibraciones inducidas por el paso de personas. Es importante destacar que el impacto del talón se usa como prueba de verificación de la adecuación frente a vibraciones al caminar, y no debe tomarse como un reemplazo simplificado del fenómeno continuo de caminar. La metodología de diseño o evaluación sigue estos pasos:

1. Calcular o medir la frecuencia natural más baja del piso;
2. Calcular o medir la aceleración máxima inicial generada por un impulso que simule el impacto del talón;
3. Determinar el valor del amortiguamiento adicional que presenta el piso y;
4. Comparar el criterio del impacto del talón con los valores aplicables a las propiedades del piso.

2.2.4 Amortiguamiento

El amortiguamiento es la capacidad de una estructura para disipar la energía de vibración, reduciendo la amplitud de los movimientos inducidos. Este se debe principalmente a la fricción y el deslizamiento en uniones, así como a los elementos no estructurales presentes (Smith et al., 2009). Una losa con alto amortiguamiento presenta menores oscilaciones frente a excitaciones periódicas, disminuyendo el riesgo de resonancia.

(Los valores y métodos de estimación propuestos por distintos autores se abordan en el capítulo de Estado del Arte.)

2.2.5 Módulo de elasticidad dinámico del concreto

El módulo de elasticidad dinámico es un parámetro que determina la rigidez del material frente a cargas dinámicas. A diferencia del módulo de elasticidad estático, que se obtiene mediante ensayos convencionales de compresión, el módulo dinámico del concreto se puede medir con dos procedimientos distintos, por la medición de la velocidad de propagación del sonido a través de la probeta de ensayo y por medida de resonancia (Del Olmo, 1986).

Este valor depende de factores como la resistencia del concreto, la edad del material, la humedad y la dirección de la carga aplicada. El módulo de elasticidad dinámico suele ser mayor que el estático, reflejando la capacidad del material de resistir deformaciones rápidas sin generar daños significativos.

En el análisis de vibraciones de lasas sometidas a cargas humanas, el módulo de elasticidad dinámico se utiliza para determinar la frecuencia natural de la losa, junto con la masa y la geometría estructural.

(Las correlaciones y valores recomendados por distintos autores y normas se presentan en el Estado del Arte.)

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



CAPITULO III:



ESTADO DEL ARTE

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPITULO III. Revisión del Estado del Arte

3.1 Estudios sobre vibraciones inducidas por personas en losas

Bachmann et al. (1995) mencionan que los pisos de edificios con grandes claros pueden tener frecuencias naturales tan bajas como 4–6 Hz, lo que los hace más propensos a vibraciones perceptibles por el paso de personas. En particular, las estructuras compuestas, como losas de concreto sobre vigas de acero, son más sensibles a estas vibraciones que las losas de concreto colado en sitio debido a su menor masa y amortiguamiento. Por lo general, las losas de concreto colado en sitio no presentan problemas de vibraciones molestas, ya que sus frecuencias naturales suelen ser mayores a 7,5 Hz.

Sin embargo Caballero-Garatachea et al. (2021) evaluaron procedimientos para el cálculo de la respuesta dinámica de losas unidireccionales de vigueta prefabricadas de concreto armado sometidas a cargas humanas. Se realizaron análisis de vibración en dos especímenes, obteniendo la frecuencia natural fundamental y la aceleración máxima, comparando resultados analíticos, numéricos y experimentales. Los autores encontraron que las frecuencias naturales de las losas estudiadas (15.90 Hz y 24.89 Hz) se encuentran fuera del rango de frecuencias asociadas al paso humano, por lo que no son susceptibles a resonancia; sin embargo, pueden presentar vibraciones excesivas y molestias para los ocupantes, especialmente en sistemas de losa que vibran como paneles bidireccionales. Además, los resultados numéricos tienden a sobreestimar la respuesta dinámica debido a que no consideran la interacción dinámica entre el peatón y la estructura. El estudio concluye que, aunque los métodos analíticos pueden ser adecuados para losas de vigueta unidireccionales, se requiere cuidado en sistemas con comportamientos más complejos, recomendando evaluar la masa activa en cada modo de vibración

3.2 Estimación del amortiguamiento estructural

Diversas guías internacionales han abordado este problema desde perspectivas empíricas. La European Commission (2006) y el proyecto HiVoSS (2008) proponen un modelo de amortiguamiento basado en la suma de tres componentes principales: estructural, no estructural y ambiental, reconociendo así la influencia combinada de los materiales, los elementos no resistentes y las condiciones de servicio, dichos valores se muestran en Tabla III.1 y Tabla III.2, respectivamente.

Por otro lado, documentos como el AISC Design Guide 11 (Murray et al., 2003), el CCIP 016 (Willford & Young, 2006) y el SCI P354 (Smith et al., 2009) presentan valores típicos de amortiguamiento en función del tipo de losa, sistema estructural y uso del edificio, lo que permite una estimación práctica para fines de diseño. Nguyen (2013) recopiló los valores propuestos en dichas guías, los cuales se presentan en la Tabla III.3

Asimismo, algunos autores han abordado la estimación del amortiguamiento de las estructuras considerando factores como los materiales, los acabados y la presencia de muebles. Smith et al. (2009) por ejemplo, propone un único factor estándar para el amortiguamiento, presentado en la Tabla III.4

Sin embargo Bachmann et al. (1995) menciona que los valores de amortiguamiento no pueden establecerse de manera general y sugiere aplicar el método de heel-drop para estimarlos en cada caso particular.

De acuerdo a Murray et al. (2003) tradicionalmente el amortiguamiento en los sistemas de piso se determinaba a partir de la decaída de la vibración tras un impacto, como un golpe de talón, utilizando señales de vibración filtradas para eliminar frecuencias superiores a 1,5–2 veces la frecuencia fundamental. Este método típicamente producía razones de amortiguamiento entre 4 y 12 % en edificios de

oficinas, pero se ha demostrado que sobreestima el amortiguamiento real, ya que incluye no solo la disipación de energía, sino también la transmisión de energía vibratoria a otros componentes estructurales. Para obtener el amortiguamiento modal correcto, es necesario filtrar todas las demás formas de vibración excepto la que se estudia, o bien determinar la razón de amortiguamiento modal a partir del espectro de Fourier de la respuesta al impacto. Aplicando estas técnicas, las razones de amortiguamiento reales para edificios de oficinas típicos se encuentran entre 3 y 5 %.

En consecuencia, la literatura evidencia que, si bien existen guías y rangos de referencia, el amortiguamiento debe evaluarse experimentalmente para cada caso particular, especialmente cuando se requiere un nivel de precisión elevado en el análisis dinámico.

Table C1-1: Components of Damping

Type	Damping (% of critical damping)
Structural Damping	
Wood	6%
Concrete	2%
Steel	1%
Steel-concrete	1%
Damping due to furniture	
Traditional office for 1 to 3 persons with separation walls	2%
Paperless office	0%
Open plan office.	0,5%
Library	1%
Houses	1%
Schools	0%
Gymnastic	0%
Damping due to finishes	
Ceiling under the floor	0,5%
Free floating floor	0%

Tabla III.1 Componentes para cálculo de amortiguamiento (European Commission, 2006)

Table 3: Determination of damping

Type	Damping (% of critical damping)
Structural Damping D_1	
Wood	6%
Concrete	2%
Steel	1%
Steel-concrete	1%
Damping due to furniture D_2	
Traditional office for 1 to 3 persons with separation walls	2%
Paperless office	0%
Open plan office.	1%
Library	1%
Houses	1%
Schools	0%
Gymnastic	0%
Damping due to finishes D_3	
Ceiling under the floor	1%
Free floating floor	0%
Swimming screed	1%
Total Damping $D = D_1 + D_2 + D_3$	

Tabla III.2 Componentes para cálculo de amortiguamiento (HiVoSS, 2008)

Table 2-3: Damping ratio for composite floors

Floor finishes	AISC/CISC DG11	CCIP-016	SCI P354
Completed composite floors with low fit-out, few non-structural components	2.0%	1.5% – 2.5%	1.1%
Completed composite floors, fully furnished with typical fit-out in normal use	3.0%	2.0% – 3.0%	3.0%
Completed composite floors with extensive fit-out and full height partitions between floors.	5.0%	3.0% – 4.5%	4.5%

Tabla III.3 Valores de amortiguamiento recomendados en guías de diseño recopilados por (Nguyen, 2013)

Table 4.1 Critical damping ratios for various floor types

ζ	Floor finishes
0.5%	for fully welded steel structures, e.g. staircases
1.1%	for completely bare floors or floors where only a small amount of furnishings are present.
3.0%	for fully fitted out and furnished floors in normal use.
4.5%	for a floor where the designer is confident that partitions will be appropriately located to interrupt the relevant mode(s) of vibration (i.e. the partition lines are perpendicular to the main vibrating elements of the critical mode shape).

Tabla III.4 Relaciones de amortiguamiento crítico para varios tipos de pisos (Smith et al., 2009)

3.3 Módulo de elasticidad dinámico

El módulo de elasticidad dinámico es fundamental para predecir la frecuencia natural de las losas bajo excitaciones rápidas. Los estudios existentes presentan enfoques distintos:

- Del Olmo (1986) propone un rango de 1.20 a 1.30 veces el módulo estático.
- Allen & Murray (1993) sugieren que el módulo dinámico equivale a 1.35 veces el módulo estático.
- Smith et al. (2009) proponen valores constantes: 38 kN/mm² para concreto normal y 22 kN/mm² para concreto ligero.

Estas diferencias reflejan que la determinación del módulo dinámico depende de múltiples factores, como la edad del concreto, humedad y condiciones de carga.

3.4 Normas y criterios de aceptación de vibraciones

Diversos autores han estudiado los límites de la percepción humana frente a las vibraciones. En este sentido, existen tanto normas nacionales como normas internacionales que establecen límites y criterios para garantizar el confort humano ante dichos efectos.

3.4.1 Normativas mexicanas

En México, la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS) define límites de exposición a vibraciones de acuerdo con el tiempo de contacto, con el fin de proteger la salud de los trabajadores en la normativa NOM-024-STPS-2001 (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2001), como se muestra en la Figura III.1.

Asimismo, las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras en la Ciudad de México (NTC CDMX, 2023)

contemplan disposiciones relacionadas con la evaluación de vibraciones en edificaciones. En su apartado referente a estructuras de concreto, se establecen fórmulas para determinar un factor de sensibilidad (K) (véase ANEXO A). Este valor se compara con los datos tabulados en la Tabla III.5 para estimar el grado de vibración del inmueble. Sin embargo, la norma no diferencia entre tipos de losas (de una o dos direcciones), sino únicamente entre sistemas apoyados en tráves o en muros.

3.4.2 Normativas internacionales

Existen también normas internacionales que regulan la percepción de vibraciones en edificaciones. Entre las más reconocidas se encuentran la BS 6472 (2008) del Reino Unido y la Guía de Diseño 11 del AISC (Murray et al., 2003). Aunque ambas presentan criterios similares, difieren ligeramente en su enfoque.

La norma BS 6472, emplea la línea de isoperceptibilidad para determinar si las vibraciones serán percibidas por los ocupantes ilustrada en la Figura III.2.. Según este criterio, las vibraciones por encima de la isolínea se consideran perceptibles, mientras que las que se sitúan por debajo son prácticamente imperceptibles.

Por otro lado, la Guía de Diseño 11 del AISC (Murray et al., 2003) propone un mapa de isolíneas según el tipo de uso del inmueble, como se muestra en la Figura III.3, además de recomendaciones específicas basadas en la Tabla III.6, que limita los valores de vibración a un máximo de 0,5 % para edificios residenciales.

Tabla 13.7.2.2 - Percepción humana para distintos valores de K

Valores de K	Percepción humana
$K \leq 1.60$	Aceptable
$1.60 < K \leq 10$	Soportable
$K > 10$	No soportable

Tabla III.5 Rangos de percepción humana de acuerdo a parámetro K adaptado de (NTC CDMX, 2023)

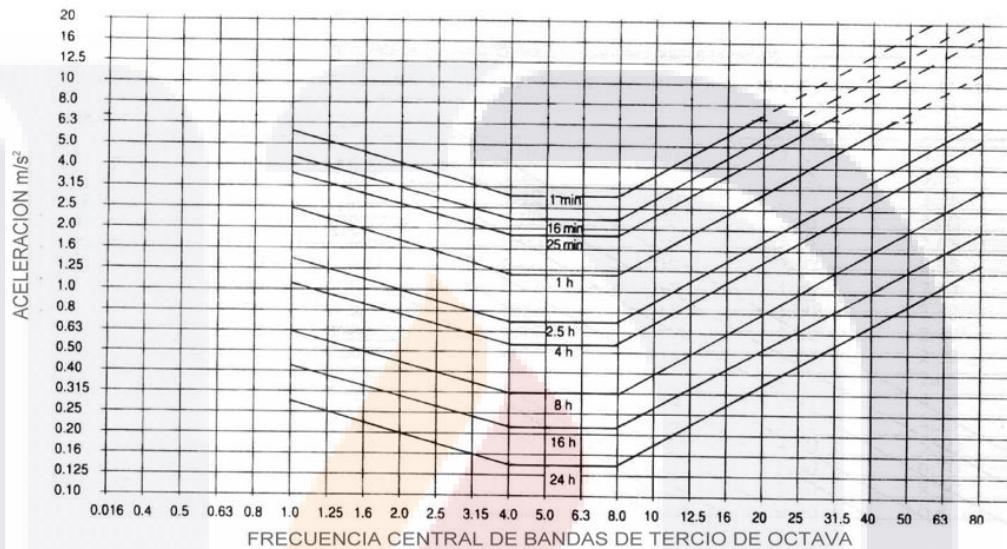


Figura III.1 Límites de exposición a vibraciones según la NOM-024-STPS-2001 (Secretaría del Trabajo y Previsión Social 2001).

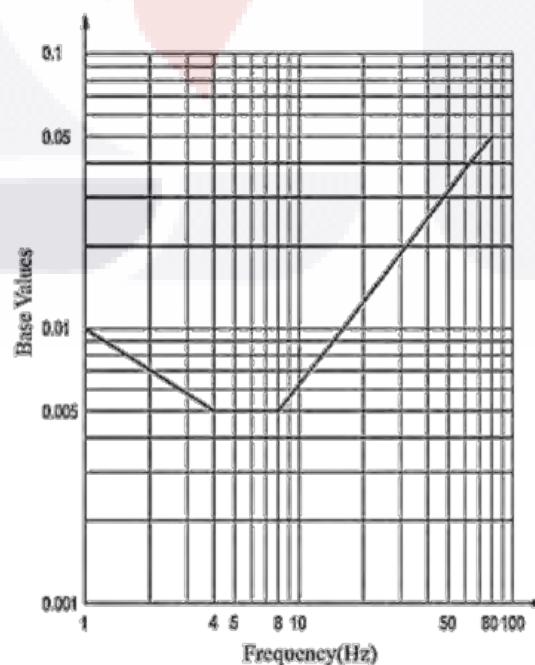


Figura III.2 Límite de percepción de vibración adaptado de (BS 6472, 2008)

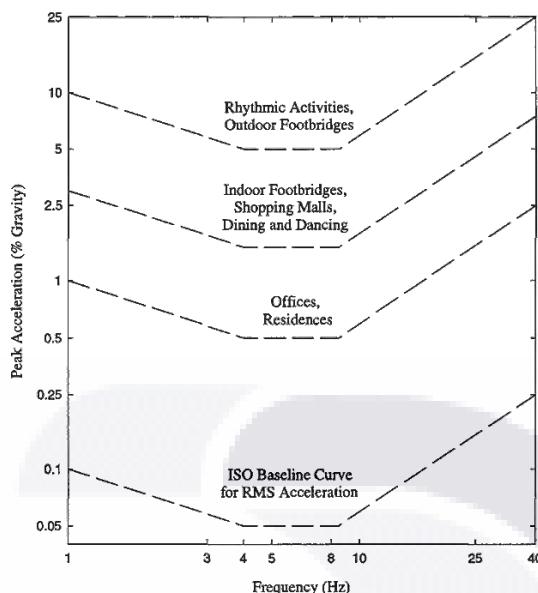


Figura III.3 aceleraciones pico recomendadas para el confort humano adoptado de (Murray et al., 2003)

Table 4.1
Recommended Values of Parameters in
Equation (4.1) and a_o/g Limits

	Constant Force P_o	Damping Ratio β	Acceleration Limit $a_o/g \times 100\%$
Offices, Residences, Churches	0.29 kN (65 lb)	0.02–0.05*	0.5%
Shopping Malls	0.29 kN (65 lb)	0.02	1.5%
Footbridges— Indoor	0.41 kN (92 lb)	0.01	1.5%
Footbridges— Outdoor	0.41 kN (92 lb)	0.01	5.0%

* 0.02 for floors with few non-structural components (ceilings, ducts, partitions, etc.) as can occur in open work areas and churches,
0.03 for floors with non-structural components and furnishings, but with only small demountable partitions,
typical of many modular office areas,
0.05 for full height partitions between floors.

Tabla III.6 Valores recomendados de parámetros para la fórmula AISC de vibraciones de pisos
(adaptado de (Murray et al., 2003) Tabla 4.1)

La revisión de normas y literatura existente muestra que los criterios para el análisis de losas de vigueta y bovedilla ante cargas de personas varían considerablemente, especialmente en la normativa mexicana. Esto evidencia la importancia de identificar cuando es necesario realizar un análisis dinámico más detallado, como el que se propone en esta investigación, para garantizar la seguridad y el confort estructural de estas losas frente al paso de personas.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



CAPITULO IV:



METODOLOGÍA

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPITULO IV. Metodología

Este capítulo describe el enfoque metodológico adoptado para el desarrollo del presente estudio. Se expone el tipo de investigación, su diseño, enfoque y los criterios utilizados para la selección de la muestra. A continuación, se presentan los equipos de medición empleados, así como el software utilizado tanto para el procesamiento de datos experimentales como para el análisis y modelado estructural.

La metodología se estructura en dos fases principales: una experimental y otra numérica. En la fase experimental, se realizaron mediciones *in situ* para registrar la respuesta dinámica de losas de vigueta y bovedilla ante cargas humanas. Para ello, se emplearon acelerómetros calibrados y se aplicaron técnicas de excitación controladas. En la fase numérica, se desarrollaron modelos por elementos finitos utilizando software especializado, con el fin de simular el comportamiento dinámico observado y validar los resultados obtenidos experimentalmente.

Posteriormente, se detalla el tratamiento y análisis preliminar de los datos recolectados, incluyendo el procesamiento de señales, el cálculo de parámetros dinámicos, y la validación de los modelos generados. Finalmente, se presentan los supuestos asumidos durante la investigación y las limitaciones metodológicas que podrían influir en la generalización de los resultados.

4.1 Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo aplicada, ya que tiene como objetivo desarrollar soluciones prácticas para determinar la necesidad de realizar análisis dinámicos en losas de vigueta y bovedilla. El estudio se basa en la observación de fenómenos dinámicos reales, y su comparación con modelos teóricos.

4.2 Enfoque de la investigación

El enfoque es experimental, dado que se realizarán mediciones en campo para obtener datos empíricos sobre la respuesta vibratoria de las losas bajo condiciones específicas de carga.

Adicionalmente, el enfoque es cuantitativo, ya que se recopilarán y analizarán datos numéricos relacionados con las vibraciones generadas por las actividades humanas. Los datos obtenidos serán procesados mediante técnicas de modelado matemático para evaluar la magnitud de las vibraciones y su relación con las cargas aplicadas. También se realizará un análisis comparativo con los modelos teóricos existentes, con el fin de verificar si estos modelos reflejan adecuadamente el comportamiento dinámico observado en la práctica. La precisión y validez de las mediciones se garantizarán mediante la repetibilidad de las pruebas y la calibración de los equipos de medición, y se tomarán en cuenta posibles fuentes de error para asegurar la fiabilidad de los resultados.

4.3 Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación es de tipo experimental de campo, ya que se busca observar el comportamiento dinámico de losas de vigueta y bovedilla en condiciones reales de uso, a través de la aplicación controlada de cargas dinámicas generadas por actividades humanas.

4.4 Población y muestra

La población del presente estudio está constituida por las losas de vigueta y bovedilla de poliestireno apoyadas sobre muros de mampostería, utilizadas en edificaciones residenciales de tipo medio y de interés social en el estado de Aguascalientes, considerando aquellos elementos que cumplen con las especificaciones técnicas correspondientes a este tipo de construcción. Para el

análisis, se seleccionaron dos losas, las cuales provienen de una edificación de tipo medio dentro del estado. Esta selección nos permitirá identificar el comportamiento estructural del inmueble para calibrar un modelo en base a los datos recopilados.

4.5 Equipos de medición

Para medir las aceleraciones generadas por la excitación de la losa, se empleó el acelerómetro triaxial WT901BLECL5.0 de WitMotion, un sensor de alta precisión capaz de registrar aceleraciones en las tres direcciones espaciales (X, Y, Z). Este dispositivo presenta un rango de medición de ± 16 g y una precisión de ± 0.01 g, y se configuró para realizar mediciones con una frecuencia de muestreo de 200Hz.

Las características y especificaciones detalladas de este acelerómetro se localizan en el ANEXO B.

4.6 Software utilizado

4.6.1 Software de procesamiento de datos

Para el procesamiento y análisis de las aceleraciones registradas en campo, se empleó el software Degtra NET2007, el cual lleva más de una década de desarrollo, por parte de investigadores y estudiantes del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM) (Ordaz et al., 2005). Este programa está diseñado para facilitar el análisis de datos sísmicos y dinámicos, permitiendo la generación de espectros de respuesta a partir de registros de aceleraciones obtenidos en diferentes ubicaciones.

Entre las principales funciones de Degtra NET2007 se encuentran:

- Filtrado y acondicionamiento de datos: Cuenta con opciones para filtrar ruido y corrección de línea base, refinando las señales para asegurar que el análisis represente con precisión las condiciones registradas durante la medición.

- Análisis espectral: Degtra NET2007 permite la transformación de los datos al dominio de la frecuencia mediante la generación de espectros de Fourier y espectros de respuesta, herramientas esenciales para identificar las frecuencias naturales y modos de vibración de la losa.
- Procesamiento de señales: El software permite la integración y derivación numérica de las señales de aceleración para obtener velocidades y desplazamientos.

4.6.2 Software de análisis y modelado estructural

Para el modelado y análisis estructural de las losas estudiadas, se empleó el software SAP2000 v26.3.0, desarrollado por Computers and Structures, Inc. (CSI). SAP2000 es una herramienta ampliamente reconocida en la ingeniería estructural que permite la creación de modelos computacionales detallados para el análisis estático y dinámico de estructuras.

Entre las principales funcionalidades del software se encuentran:

- Modelado geométrico: permite definir con precisión las dimensiones y características físicas de los elementos estructurales.
- Asignación de propiedades materiales y condiciones de contorno: posibilita la especificación de parámetros como el módulo de elasticidad, densidad, rigidez y tipos de apoyo.
- Análisis estructural: SAP2000 permite realizar análisis tanto estáticos como dinámicos, incluyendo análisis modal, espectral y tiempo-historia no lineales.
- Posprocesamiento de resultados: el software proporciona salidas numéricas, incluyendo períodos de vibración, masas participantes y rigideces modales.

Estos datos permiten comparar directamente la respuesta dinámica obtenida en el modelo con los resultados medidos en campo.

4.6.3 Software de visualización y procesamiento de datos

Python, un lenguaje de programación desarrollado por Guido van Rossum, fue el software utilizado para la generación de gráficos, análisis y representación visual de los datos obtenidos durante la investigación. Gracias a su amplia gama de librerías, permitió realizar las siguientes tareas:

Visualización de datos: Creación de gráficos de líneas, para analizar los resultados de los acelerogramas y en las respuestas estructurales.

Mapas de calor: Generación de mapas que representaron de manera intuitiva la distribución de vibración crítica, facilitando la interpretación de patrones complejos.

4.7 Procedimiento experimental

En esta fase experimental, se llevó a cabo un conjunto de mediciones en edificaciones seleccionadas, utilizando acelerómetros para registrar la respuesta dinámica de las losas.

Las mediciones se llevaron a cabo durante actividades que simulan cargas humanas típicas, tales como la caminata y el método de heel-drop, que consiste en dejar caer el peso del cuerpo sobre la losa al elevarse sobre la punta de los pies y luego caer de talón, lo que produce una vibración de mayor magnitud, facilitando la captura de la respuesta dinámica de la losa ante esfuerzos transitorios.

Cada sesión de medición tuvo una duración aproximada de 30 segundos para las caminatas y 10 segundos para el “heel-drop”. Los datos obtenidos permitieron

identificar las frecuencias y amplitudes de vibración de la losa bajo condiciones reales de uso.

4.7.1 Registro de características estructurales

Se realizó un levantamiento detallado de las características físicas y geométricas de la losa evaluada, lo cual incluyó las siguientes variables:

- Dimensiones de la losa (longitud, ancho, y espesor).
- Condiciones de los apoyos (tipo de apoyo, ubicación y condiciones de fijación).
- Continuidad en muros (si la losa está soportada por muros en sus bordes o si está simplemente apoyada).
- Materiales de la losa (tipos de materiales utilizados en la estructura y los acabados, como concreto, mampostería, etc.).

4.7.2 Posición de acelerómetros

Los acelerómetros se ubicaron en el centro de la losa debido a que este punto representa de manera más precisa las vibraciones globales de la estructura, especialmente en los modos de vibración flexional. La ubicación central permite una medición más equilibrada de la frecuencia natural de la losa, minimizando los efectos derivados de las variaciones locales en la rigidez y las posibles interferencias generadas por elementos de soporte o discontinuidades cercanas a los bordes. Su función fue registrar las fluctuaciones de aceleración generadas por las excitaciones aplicadas, con el objetivo de conocer la frecuencia natural de la losa.

4.7.3 Calibración y validación de equipos

Todos los acelerómetros fueron calibrados antes de cada conjunto de pruebas, siguiendo el manual de uso del equipo (véase ANEXO C), con el objetivo de garantizar mediciones precisas.

Se verificó que cada acelerómetro estuviera firmemente colocado en la base y que la base estuviera correctamente nivelada antes de iniciar las mediciones.

4.7.4 Excitación de las losas

Se utilizó el método de heel-drop, el cual se efectuó al centro de la losa, con el propósito de generar excitación localizada la cual permitió evaluar las frecuencias naturales de vibración y la respuesta ante cargas dinámicas.

4.8 Desarrollo del modelo numérico

En esta fase, se desarrolló un modelo numérico utilizando el software de análisis de elementos finitos, SAP2000, para simular el comportamiento dinámico de las losas. El modelo se construyó considerando la geometría y las propiedades del material, incluyendo densidad, coeficiente de Poisson y el módulo de elasticidad dinámico del concreto, adoptado como $1.35 E_c$ según valores reportados dados en la guía de diseño 11 del AISC (Murray et al., 2003). Este modelo permitió evaluar las frecuencias naturales de la losa. Además, se validó el comportamiento de los modelos mediante la comparación con los datos obtenidos en las pruebas experimentales de campo, lo que permitió generar nuevos modelos matemáticos que consideraron cambios en el comportamiento de la losa, variando sus dimensiones y tipo de concreto.

4.9 Tratamiento y análisis preliminar de datos

En esta sección se detallará el procesamiento de los datos de aceleración recopilados durante las pruebas experimentales, para lo cual se utilizó el programa de procesamiento de ondas *DegraNET2007*. El propósito principal de este

procesamiento fue determinar la frecuencia natural de la losa. Para ello, se aplicó la Transformada de Fourier, una técnica matemática que permite convertir las señales de aceleración en el dominio de la frecuencia, facilitando la identificación de las frecuencias de vibración dominantes.

4.9.1 Procesamiento de señales

- Filtrado de datos: Se realizó una corrección de línea base normal para compensar posibles desplazamientos de la señal y asegurar la fidelidad de los datos experimentales. Adicionalmente, se aplicaron filtros digitales pasa-banda con el objetivo de eliminar el ruido y las interferencias no deseadas en las señales registradas, manteniendo únicamente la frecuencia predominante y mejorando la calidad de la señal.
- Transformación de las señales: Se utilizó la Transformada de Fourier para convertir las señales de aceleración del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Este análisis espectral permitió identificar las frecuencias de vibración de la losa y otras características dinámicas, como las frecuencias naturales de resonancia y las amplitudes de las oscilaciones.

4.9.2 Cálculo de parámetros dinámicos

A partir de las señales procesadas, se calcularon los parámetros dinámicos clave, como las frecuencias naturales y el coeficiente de amortiguamiento.

4.9.3 Corrección de posibles desviaciones

Cuando se detectaron desviaciones o anomalías en los datos, se aplicaron las correcciones correspondientes con el fin de garantizar que los resultados fueran consistentes y representaran adecuadamente las condiciones experimentales.

4.10 Validación de modelos numéricos

La validación del modelo numérico se realizó mediante la comparación de las frecuencias naturales obtenidas experimentalmente (a partir del análisis de los registros mediante la transformada de Fourier) con las frecuencias obtenidas en el análisis modal del modelo numérico.

4.11 Supuestos y limitaciones metodológicas

Supuestos:

- En el desarrollo de la metodología, se asume que el comportamiento de la losa es lineal y homogéneo en su estructura.
- Se considera que las propiedades mecánicas del concreto, tales como el módulo de elasticidad, la densidad y la resistencia, son constantes y uniformes a lo largo de toda la losa durante el experimento y la simulación.
- Las condiciones de frontera del modelo numérico han sido idealizadas, considerando los elementos como simplemente apoyados, descartando factores como conexiones o variaciones en la rigidez local.
- Se asume que no hay variaciones significativas en las propiedades del material debido a cambios de temperatura u otras condiciones ambientales durante el experimento.
- Se considera que los acelerómetros utilizados en la medición de la aceleración tienen un comportamiento perfectamente lineal y rígido, sin considerar posibles errores derivados de la calibración o la sensibilidad de los sensores.

Limitaciones:

- El estudio se limita a las losas de vigueta de alma abierta y bovedilla de poliestireno, apoyadas sobre muros de mampostería.

- El estudio se limita a edificaciones residenciales de tipo medio y de interés social, por lo que los resultados no necesariamente son aplicables a construcciones de otro tipo (como comerciales o industriales).
- El análisis se enfoca únicamente en las vibraciones generadas por actividades humanas comunes (caminar, correr, brincar, etc.), excluyendo cargas excepcionales como las provenientes de maquinaria pesada o vibraciones sísmicas.
- Las mediciones experimentales se llevarán a cabo exclusivamente en edificaciones situadas en el estado de Aguascalientes, lo que limita la representatividad de los resultados a esta región geográfica y a edificaciones con características estructurales similares (como tipo de material, distribución de cargas, etc.).
- Este estudio no aborda la fatiga del material ni la degradación a largo plazo de las losas.
- No se consideran los efectos de viento, acústicos ni térmicos.
- No se considera la frecuencia del terreno ni sus efectos en la respuesta dinámica de la estructura, lo que implica que no se analizan posibles amplificaciones o atenuaciones de las vibraciones causadas por la interacción entre el suelo y la edificación.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



CAPITULO V:



CAMPAÑA EXPERIMENTAL

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPITULO V. Campaña experimental

5.1 Descripción general de la campaña

La campaña experimental tiene como objetivo principal medir y analizar la respuesta dinámica de losas de vigueta y bovedilla sometidas a cargas dinámicas. Este estudio forma parte de una investigación orientada a comprender el comportamiento estructural de dichos elementos frente a cargas dinámicas, con el propósito de obtener datos experimentales que permitan validar modelos numéricos desarrollados posteriormente.

Para la recolección de los datos se emplearon técnicas de medición in situ, que incluyeron el uso de acelerómetros calibrados, los cuales registraron con las respuestas dinámicas generadas por las cargas aplicadas sobre las losas. Los acelerómetros se colocaron al centro de la losa, de modo que fuera posible obtener una representación fiel del comportamiento estructural durante las pruebas.

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo bajo condiciones controladas, en las cuales se aplicó la técnica de excitación *heel-drop* para generar una vibración representativa.

El procedimiento seguido se describe a continuación.

5.2 Inspección y preparación inicial

Después de seleccionar el espacio de prueba mencionado en el capítulo de Metodología, se procedió a la preparación del sitio, etapa esencial para garantizar la precisión de las mediciones y el éxito de las pruebas. Este proceso involucra diversas acciones previas que aseguran la correcta obtención de los datos. A continuación, se detalla el proceso seguido para llevar a cabo esta preparación.

5.2.1 Inspección Previa y Levantamiento de Características Estructurales

Antes de realizar cualquier medición, se llevó a cabo una inspección del espacio seleccionado para asegurar que las condiciones estructurales fueran adecuadas para la experimentación. Durante esta inspección se registraron las características geométricas y materiales de las losas, lo que incluyó:

- Mediciones geométricas de la losa: se tomaron las dimensiones de cada losa con el objetivo de obtener un registro claro y detallado de las longitudes, anchos y espesores. En primer lugar, se midió cada losa tanto en las direcciones principal como secundaria, de lo anterior se pudieron obtener las dimensiones indicadas en la Tabla V.1.

Dimensiones	Lateral 1 (cm)	Centro (cm)	Lateral 2 (cm)	Promedio
Largo	500	500	501	500
Ancho	399	400	401	400

Tabla V.1 Geometría general de las losas medidas en campo

A continuación, se midió el espesor en los extremos y en el centro de la losa, con el fin de asegurar que no existieran discrepancias en la sección transversal que pudieran afectar las respuestas dinámicas durante las pruebas, los resultados de las mediciones se presentan en la Tabla V.2.

Espesor	Lateral 1 (cm)	Centro (cm)	Lateral 2 (cm)	Promedio
1	19.1	19	19.2	19.1
2	19.2	19.1	19.2	19.2
3	19.2	19.1	19.2	19.2

Tabla V.2 Espesor de las losas medidas en campo.

Debido a que la variación de las dimensiones del espesor fue muy pequeña ($\pm 2\text{mm}$), se optó por seleccionar un espesor constante de 19cm.

Por último, se registraron las dimensiones detalladas de las viguetas presentes en la construcción. Al tratarse de viguetas prefabricadas, sus características permanecerán constantes, como se muestra en la Figura V.1.

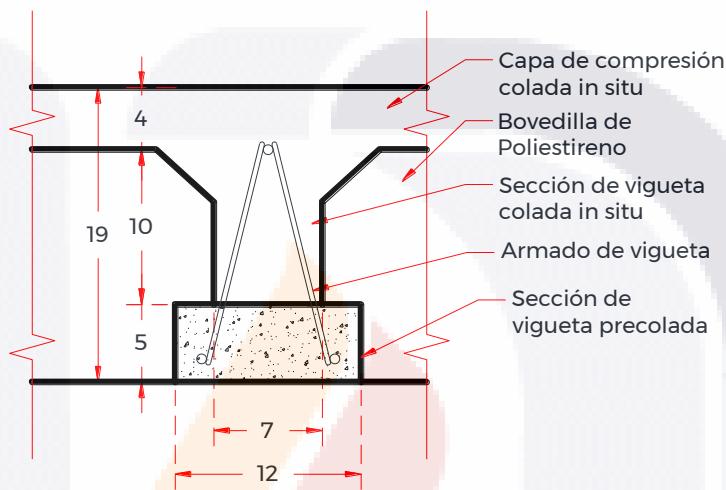


Figura V.1 Geometría de la sección transversal de las viguetas medidas en campo

- Materiales de construcción: Mediante una inspección visual se pudo determinar el material del cual estaban compuestos los muros y con ayuda de un esclerómetro se pudo obtener la resistencia del concreto como se muestra en la Tabla V.3.

Elemento	Material
Muros	Tabique rojo recocido artesanal
Losas	Concreto $f'c=250\text{kg/cm}^2$
Bovedilla	Poliestireno expandido (EPS)

Tabla V.3 Materiales identificados en mediciones de campo

- Condiciones de los apoyos: Se inspeccionaron los puntos de apoyo y las condiciones de fijación de las losas, para asegurarse de que no existieran defectos estructurales que pudieran interferir con las mediciones.
- Inspección y acondicionamiento de la estructura: Antes de iniciar las pruebas, se realizó una inspección de las losas que iban a ser evaluadas. Esta inspección incluyó la verificación del estado físico de las losas, asegurando que no existieran defectos visibles que pudieran alterar los resultados de las mediciones.

5.2.2 Preparación del Área de Estudio

Tras completar la inspección estructural, se procedió a retirar los muebles y demás objetos del área de estudio, dejando el espacio despejado y limpio. Esto permitió asegurar que no existieran obstáculos que pudieran interferir con la instalación de los equipos o con la realización de las mediciones.

5.2.3 Instalación de Equipos y Verificación de Condiciones de Medición

Una vez despejado el sitio, se procedió a instalar los acelerómetros para llevar a cabo las mediciones experimentales. La instalación de los acelerómetros se realizó siguiendo los siguientes pasos:

- Fijación de los acelerómetros: Los sensores se colocaron en el centro de las losas, cada acelerómetro estará fijado a una base metálica, diseñada para transmitir las vibraciones producidas en la losa de manera eficiente al dispositivo de lectura. Esta base también proporciona un anclaje firme, asegurando que los acelerómetros permanezcan en su lugar durante las pruebas. Cada base consta de una placa metálica con dimensiones base de 11.40cmx20.00cm y espesor constante de 0.95cm, a su vez, cuentan con un sistema de nivelación ajustable que permite colocar los acelerómetros en una

posición completamente horizontal, independientemente de las irregularidades de la superficie. Este sistema garantiza que el acelerómetro esté correctamente alineado para capturar las vibraciones de manera precisa en todas las condiciones de prueba. Las bases son transportables, lo que facilita su instalación en diferentes losas de vigueta y bovedilla sin comprometer la estabilidad del equipo ni causar daños en las losas.



Figura V.2 Instalación y calibración de acelerómetro en losa

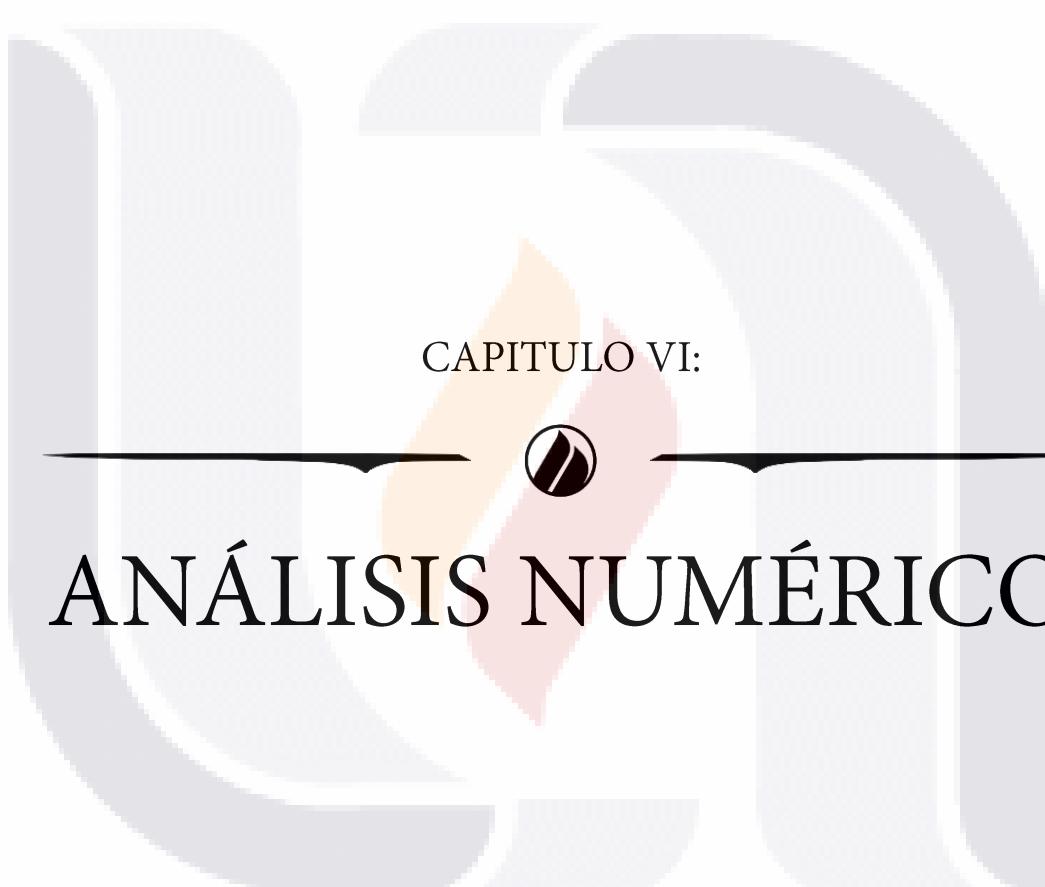
- Calibración de los equipos: Se calibraron los acelerómetros antes de las mediciones, siguiendo el procedimiento indicado en el manual del fabricante como se detalla en el (ANEXO C), con una frecuencia de retorno de 200hz para

5.3 Desarrollo de las pruebas

Las pruebas experimentales fueron realizadas utilizando el método de excitación por heel-drop, en el cual una persona se posiciona en el punto donde se desea generar el impacto, se coloca de puntas con los pies juntos y deja caer los talones sobre la losa, produciendo así un impacto localizado que excita la estructura.

En el protocolo experimental, la misma persona fue responsable de realizar el heel-drop en cada prueba. Esta persona tenía un peso aproximado de 70 kg y una altura constante de caída de aproximadamente 10cm desde el nivel de la losa. Se posicionó en el centro de la losa, junto al acelerómetro, para garantizar un impacto localizado. Luego, se comenzó a grabar las aceleraciones conforme lo indicado en el manual del fabricante (ANEXO D), manteniendo la persona una posición fija durante aproximadamente 5 segundos antes de realizar el heel-drop. Después de ejecutar el heel-drop, permaneció en la misma posición durante 5 segundos más para capturar todo el espectro de la onda de manera adecuada.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



CAPITULO VI:



ANÁLISIS NUMÉRICO

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPITULO VI. Análisis numérico

6.1 Descripción general del proceso de análisis

El análisis numérico tiene como objetivo principal procesar los datos obtenidos durante la campaña experimental, así como desarrollar y validar modelos numéricos para simular el comportamiento dinámico de las losas.

Se realizó un tratamiento de las señales registradas por los acelerómetros, que incluyó la eliminación de ruido y el filtrado de frecuencias irrelevantes. Con estas señales procesadas, se calcularon parámetros dinámicos, como las frecuencias naturales y el amortiguamiento estructural.

Posteriormente, se desarrollaron modelos por elementos finitos con el objetivo de simular el comportamiento dinámico observado. Estos modelos fueron calibrados utilizando los datos experimentales mediante la comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones con los datos de campo.

A continuación, se detalla el proceso adoptado:

6.2 Procesamiento de datos experimentales

6.2.1 Organización y Validación de Datos Obtenidos en Campo

Tras realizar las mediciones correspondientes con los acelerómetros, el software WitMotion-2024.11.7.0 genera un reporte en formato .txt que incluye datos como el tiempo, la aceleración en los ejes x, y, z, así como los ángulos de inclinación, entre otros. Sin embargo, para los fines de este estudio, solo es relevante la aceleración vertical. Por lo tanto, el archivo generado se procesa en Excel, de manera que se extraigan únicamente los datos de aceleración vertical. Posteriormente, se transforma el archivo a

formato de texto, lo que permite su importación en el software de procesamiento de señales *Degtra*.

El filtrado completo de datos se puede encontrar en el (ANEXO F).

Tabla VI.1 Presentación de documento generado por acelerómetro

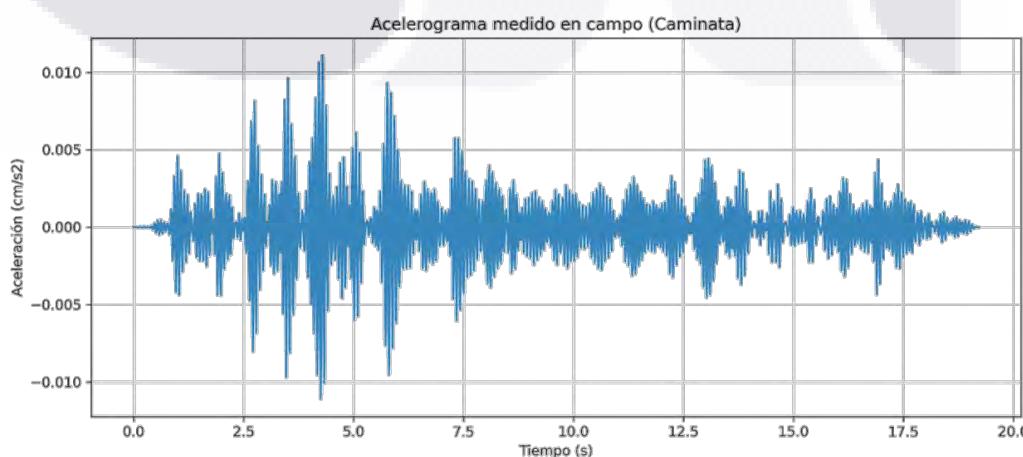


Figura VI.1 Acelerograma de losa sometida a vibración mediante caminata, medido en campo

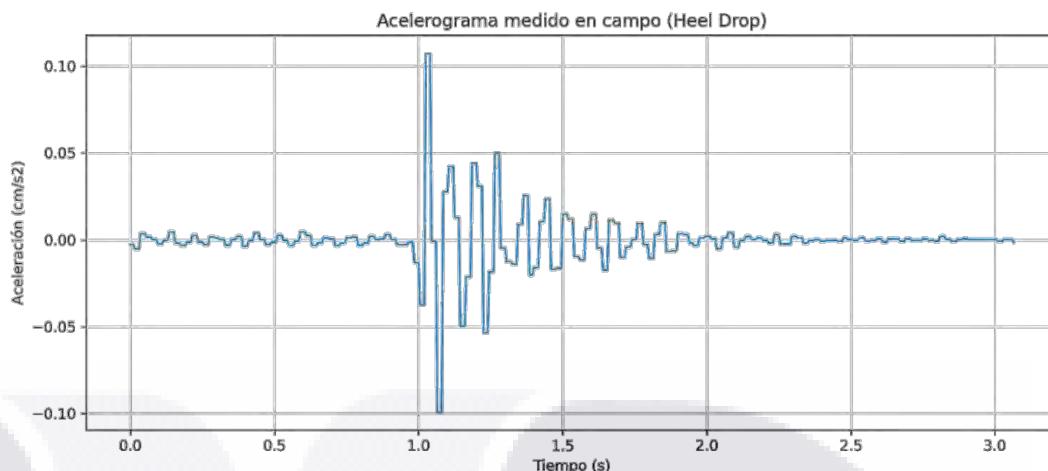


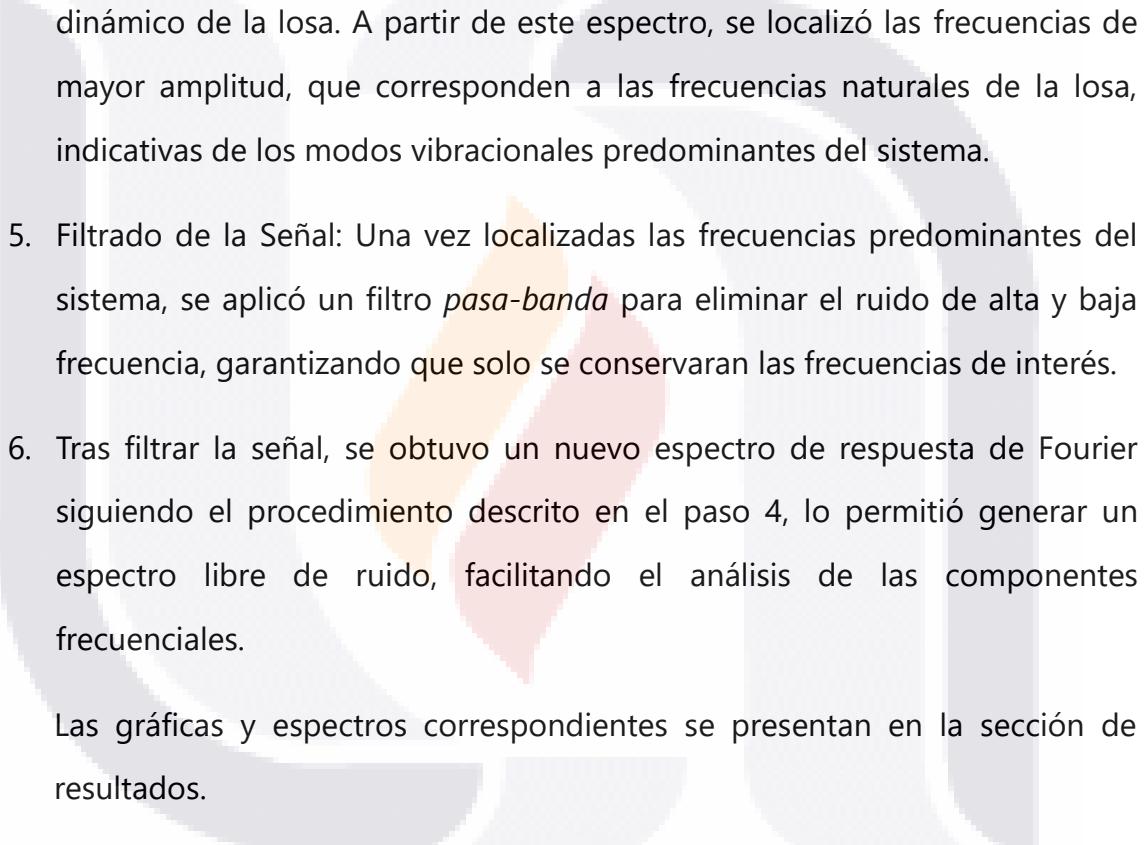
Figura VI.2 Acelerograma de losa sometida a vibración mediante impacto (Heel-drop), medido en campo

6.2.2 Procesamiento de los datos en el software Degtra

Una vez generado el archivo de texto, los datos se importan al software DegtraNET2007 para su procesamiento y filtrado. Para ello, se introduce el incremento de tiempo entre cada señal medida, que es de 0.005 segundos, correspondiente a una frecuencia de medición de 200 Hz.

Dentro del software, se realizaron los siguientes pasos para mejorar la calidad de los datos, con el fin de obtener señales más representativas para el análisis:

1. Recorte de la Sección Representativa: Se recortó la señal para centrarse en la porción más relevante del registro, descartando los segmentos innecesarios que no contribuían al análisis.
2. Ajuste de Línea Base: Debido a que los datos obtenidos en el reporte de aceleraciones están referenciados en torno a $y=1$ y para compensar posibles desplazamientos de la línea base, se aplicó un filtro de corrección de línea base normal. Esto permite que las mediciones de aceleración reflejen con mayor precisión los cambios reales en la aceleración vertical, eliminando las distorsiones iniciales.

- 
3. Escalado de la Señal: Las unidades de aceleración del archivo de datos están expresadas en términos de la gravedad relativa (g). Para convertir estas unidades a [cm/s²], se aplicó un factor de amplificación de 981.
 4. Generación del espectro de respuesta de Fourier: Se aplicó la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtener el espectro de frecuencias de la señal, lo que permitió identificar las frecuencias predominantes en el comportamiento dinámico de la losa. A partir de este espectro, se localizó las frecuencias de mayor amplitud, que corresponden a las frecuencias naturales de la losa, indicativas de los modos vibracionales predominantes del sistema.
 5. Filtrado de la Señal: Una vez localizadas las frecuencias predominantes del sistema, se aplicó un filtro *pasa-banda* para eliminar el ruido de alta y baja frecuencia, garantizando que solo se conservaran las frecuencias de interés.
 6. Tras filtrar la señal, se obtuvo un nuevo espectro de respuesta de Fourier siguiendo el procedimiento descrito en el paso 4, lo permitió generar un espectro libre de ruido, facilitando el análisis de las componentes frecuenciales.

Las gráficas y espectros correspondientes se presentan en la sección de resultados.

6.3 Obtención del porcentaje de amortiguamiento

Una vez identificado el comportamiento dinámico de la losa y su frecuencia natural a través del espectro de Fourier, el siguiente paso fue calcular el porcentaje de amortiguamiento con el método de decaimiento logarítmico, como se muestra a continuación:

- Medición de las amplitudes de aceleración pico: Se midieron las amplitudes de la aceleración pico en una secuencia de ciclos de vibración, asegurándose de que todas las mediciones de amplitud se tomaran en la misma dirección de la aceleración (descendentes).
- Identificación de los picos: Se identificó la amplitud del primer pico, denominado u_i . Posteriormente se seleccionó la amplitud de un pico posterior, denominado u_{i+n} , donde n es el número de ciclos que separan ambos picos.
- Cálculo del decaimiento logarítmico: Con las amplitudes de los dos picos seleccionados, se calcula el decaimiento logarítmico δ , que mide cómo se reduce la amplitud a lo largo del tiempo. Para lo cual se hizo uso de la siguiente formula:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{u_i}{u_{i+n}} \right)$$

- Cálculo del porcentaje de amortiguamiento: Una vez obtenido el valor de δ , se utiliza este valor para calcular el porcentaje de amortiguamiento ζ , que describe la eficacia con la que el sistema pierde energía durante la vibración. Para lo cual se utiliza la siguiente formula:

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi}$$

6.4 Construcción de Modelos Numéricos

El objetivo del modelo numérico en este estudio es simular y evaluar el comportamiento dinámico de las losas de vigueta y bovedilla mediante la determinación de sus frecuencias naturales, con el propósito de caracterizar su respuesta estructural.

Como se mencionó en capítulos anteriores, el software SAP2000 fue seleccionado para la modelación numérica debido a sus capacidades avanzadas en la simulación estructural y su flexibilidad para llevar a cabo el tipo de análisis dinámico requerido para este estudio. SAP2000 cuenta con las herramientas necesarias para realizar los procedimientos de análisis estático y dinámico.

A continuación, se detallan los aspectos clave que definen la construcción del modelo numérico:

6.4.1 Geometría del modelo

El modelo estructural fue desarrollado a partir de las dimensiones y características reales de la edificación, las cuales fueron obtenidas durante la campaña experimental, descrita en el Capítulo V. La geometría del modelo es tridimensional, lo que permite representar de manera más precisa la interacción de los distintos componentes estructurales bajo las condiciones de carga. El modelo abarca una estructura de un solo nivel, con una altura total de 3.00 m, y está compuesto principalmente por muros de carga y losas de vigueta y bovedilla, cuyas viguetas se encuentran dispuestas a una distancia de 70 cm a centros.

6.4.2 Tipo de modelación:

En el modelo numérico desarrollado, se adoptó una representación de los componentes estructurales existentes, utilizando diferentes tipos de elementos de acuerdo con su comportamiento mecánico y su contribución a la rigidez global de la estructura:

- Muros de carga: Fueron modelados como elementos tipo shell-thin, lo que permite representar su respuesta estructural tanto en el plano como fuera de él. Esta aproximación es adecuada dado que los muros de carga, al ser

elementos principalmente resistentes a esfuerzos de compresión, pueden ser simulados eficientemente mediante elementos de este tipo, considerando su capacidad para resistir tanto cargas laterales como verticales.

- Viguetas de la losa: Se representaron mediante elementos tipo frame, que permiten capturar su comportamiento bajo esfuerzos de flexión y corte. Las viguetas actúan como elementos lineales que transmiten las cargas de la losa hacia los muros.
- Capa de compresión: Sobre las viguetas del sistema de entrepiso, se modeló la capa de compresión de concreto como un elemento independiente tipo shell-thin. Este enfoque permite simular la distribución de esfuerzos a través de la capa de compresión y su interacción con las viguetas. Para garantizar una transferencia adecuada de esfuerzos entre las viguetas y la capa de compresión, se utilizaron vínculos rígidos (rigid links), los cuales aseguran que ambos elementos trabajen de manera conjunta bajo las cargas aplicadas.
- Bovedillas: Debido a que las bovedillas están fabricadas de poliestireno y no aportan rigidez ni resistencia estructural, fueron excluidas del modelo. Esta simplificación es válida ya que las bovedillas principalmente tienen la función de aligerar la losa sin contribuir a la capacidad de la estructura. De este modo, se optimiza el modelo sin perder precisión en el análisis de la estructura principal.

Las características completas de cada uno de estos elementos, así como las propiedades específicas utilizadas en la modelación, se pueden consultar en el ANEXO G.

Elemento	Tipo	Espesor (cm)
Muros	Shell-Thin	15
Capa de compresión de losa	Shell-Thin	4
Viguetas de concreto	Frame	-
Conectores de losa	Link	-
Bovedilla de poliestireno	No modelada	-

Tabla VI.2 Características de los elementos estructurales utilizados en el modelo numérico

6.4.3 Propiedades de los materiales:

Las propiedades de los materiales utilizados en el modelo estructural fueron determinadas de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y la Construcción de Estructuras de la Ciudad de México (CDMX) 2023 en los apartados de diseño de estructuras de mampostería y diseño de estructuras de concreto respectivamente.

Para este estudio, se asumió que los materiales presentan un comportamiento lineal elástico, lo que implica que la deformación de los materiales es directamente proporcional a las cargas aplicadas, y que no se consideran efectos no lineales como el agrietamiento del concreto o el comportamiento plástico de los materiales bajo cargas extremas. Esta suposición es válida dado que el modelo se enfoca en análisis dentro de los límites elásticos de la estructura, y las cargas consideradas no exceden los rangos en los cuales los materiales experimentarían un comportamiento no lineal significativo.

Las características de cada material, junto con los valores numéricos utilizados para su modelación, se presentan en las Tabla VI.3, Tabla VI.4 y Tabla VI.5. De igual manera en el ANEXO H se presentan los valores registrados en el software de modelación numérica.

PROPIEDADES DE LA MAMPOSTERÍA			
Material de las piezas de mampostería:	Arcilla Artesanal		
Forma de las piezas de mampostería:	Macizo		
Clasificación:	Tabique macizo de arcilla artesanal		
Densidad	(d):	1,600	kg/m ³
MORTERO			
Clasificación de Mortero	Tipo I		
Resistencia a la compresión del Mortero	(f' _j):	125	kg/cm ²
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS			
Resistencia a la compresión de las piezas	(f' _p):	60	kg/cm ²
Resistencia a la compresión de mampostería	(f' _m):	20	kg/cm ²
Resistencia a la compresión diagonal	(V' _m):	4.5	kg/cm ²
Modulo de elasticidad de mampostería	(Em):	12,000	kg/cm ²

Tabla VI.3 Propiedades de la mampostería utilizada en los modelos numéricos

PROPIEDADES DEL CONCRETO			
Clase del concreto a utilizar:	1A		
Resistencia a la compresión del concreto (f' _c):	250		[kg/cm ²]
Tipo de agregados petreos del concreto:	Calizo		
Módulo de elasticidad estático del concreto (Ec):	221,359		[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad dinámico del concreto (1.35Ec):	298,835		[kg/cm ²]
Resistencia a la tensión del concreto (ft):	23.72		[kg/cm ²]
Módulo de rotura del concreto (ff):	31.62		[kg/cm ²]
Deformación unitaria de contracción por secado (ecf):	≤ 0.001		
Coeficiente de deformación axial final por flujo plástico:	2		
Módulo de Poisson (v)	0.2		
Densidad	2,400		[kg/m ³]

Tabla VI.4 Propiedades del concreto clase 1A utilizado en los modelos numéricos

PROPIEDADES DEL CONCRETO			
Clase del concreto a utilizar:	2		
Resistencia a la compresión del concreto (f' _c):	200		[kg/cm ²]
Tipo de agregados petreos del concreto:	Calizo		
Módulo de elasticidad estático del concreto (Ec):	113,137		[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad dinámico del concreto (1.35Ec):	152,735		[kg/cm ²]
Resistencia a la tensión del concreto (ft):	16.97		[kg/cm ²]
Módulo de rotura del concreto (ff):	16.97		[kg/cm ²]
Deformación unitaria de contracción por secado (ecf):	≤ 0.002		
Coeficiente de deformación axial final por flujo plástico:	4		
Módulo de Poisson (v)	0.2		
Densidad	2,400		[kg/m ³]

Tabla VI.5 Propiedades del concreto clase 2 utilizado en los modelos numéricos

6.4.4 Condiciones de apoyo y conexiones estructurales:

Las condiciones de apoyo y las conexiones entre los diferentes elementos estructurales fueron definidas en el modelo numérico para reflejar el comportamiento real del sistema. Cada uno de los elementos fue modelado teniendo en cuenta las características del sistema constructivo y las restricciones físicas observadas en la edificación real.

- Viguetas: Se asumió que las viguetas del sistema de entrepiso están simplemente apoyadas en sus extremos, lo que es coherente con el sistema constructivo utilizado en la edificación, donde las viguetas descansan sobre muros o trabes sin anclajes rígidos. En el modelo de SAP2000, esta condición se implementó mediante la liberación de momentos flectores en los extremos de las viguetas, permitiendo así la rotación libre en esos puntos. Esto simula el comportamiento de flexión de las viguetas sin restricciones rotacionales, reflejando la libertad de movimiento en los puntos de apoyo.
- Capa de compresión: Tal como se mencionó en el apartado anterior, la capa de compresión fue conectada a las viguetas mediante vínculos rígidos (rigid links). Esta configuración asegura una correcta transferencia de esfuerzos entre las viguetas y la capa de compresión, permitiendo que ambos elementos trabajen de manera conjunta bajo las cargas aplicadas.
- Intersección entre capa de compresión y muros de carga: En la intersección de la capa de compresión y los muros de carga, se aplicó una liberación de momentos para evitar la creación de una conexión rígida que no representa el comportamiento real del sistema estructural. Esta liberación permite simular una articulación en los puntos de contacto entre la capa de

compresión y los muros, lo que facilita la transferencia de cargas sin imponer restricciones poco realistas en el modelo.

- Muros de carga: Los muros de carga fueron modelados con empotramientos en su base, representando una conexión rígida con la cimentación que garantiza la transferencia de cargas al terreno.

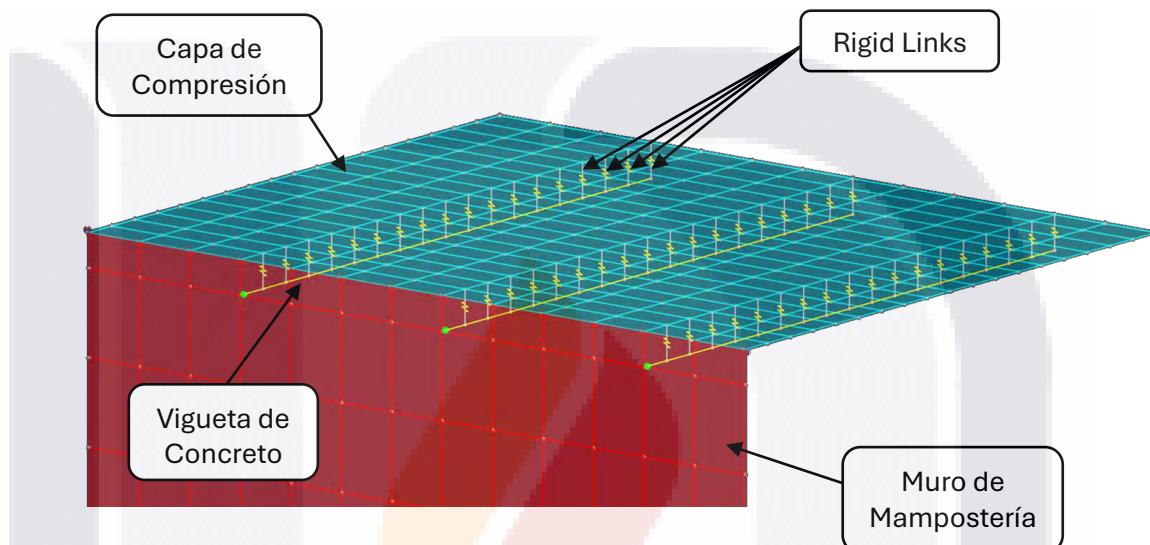


Figura VI.3 Disposición de elementos estructurales en módulo de SAP2000

6.4.5 Discretización de la malla:

Para representar la estructura en el software SAP2000, se utilizó el método de elementos finitos (FEM), que permite discretizar la estructura continua en un conjunto de elementos finitos para su análisis. Los parámetros de discretización fueron definidos de la siguiente manera:

- Eje X: Se definió una separación de 0.175 m, que corresponde a la distancia promedio entre las viguetas (0.70m) dividida en 4 segmentos.
- Eje Y: En el eje Y, la separación fue de 0.1 m, esta discretización además de capturar de manera más precisa el comportamiento de los elementos

estructurales, facilitará el proceso de modelado de los futuros análisis donde se plantea incrementar o disminuir esta dimensión.

- Eje Z: En el eje Z, se utilizó una separación de 0.25 m, la cual corresponde a la altura de la estructura (3.00m) dividida en 12 segmentos.

El número total de elementos utilizados para cada componente estructural, así como la distribución espacial de la malla, se detallan en las Tabla VI.6 y Tabla VI.7, con ayuda de la Figura VI.4

Elemento	Longitudes en el eje			Area (m ²)
	X (m)	Y (m)	Z (m)	
Muros Caras 1 y 3	4.00	0.00	3.00	24.00
Muros Caras 2 y 4	0.00	5.00	3.00	30.00
Capa de compresión de losa	4.00	5.00	0.00	20.00
Viguetas de concreto	0.00	5.00	0.00	-

Tabla VI.6 Dimensiones de los elementos estructurales basados en las condiciones medidas en campo

Elemento	Espaciamiento de malla			Segmentos en el eje			Total de segmentos
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (elem)	Y (elem)	Z (elem)	
Muros Caras 1 y 3	0.175	0.000	0.250	23	0	12	552
Muros Caras 2 y 4	0.000	0.100	0.250	0	50	12	1200
Capa de compresión de losa	0.175	0.100	0.000	23	50	0	1150
Viguetas de concreto	0.000	0.100	0.000	0	50	0	250

Tabla VI.7 Distribución de la malla para cada componente estructural.

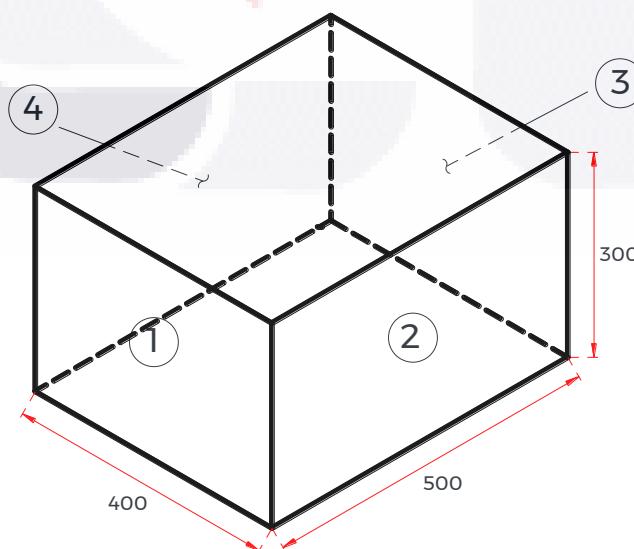


Figura VI.4 Geometría general de la estructura y nomenclatura de caras.

6.5 Parametrización del Modelo

En esta sección se presentan los parámetros principales del modelo estructural implementado en SAP2000, incluyendo la definición de los casos de carga y el análisis modal.

6.5.1 Definición de los Casos de Carga

Los casos de carga representan escenarios específicos que describen cómo diferentes tipos de cargas afectan a la estructura. En este estudio se definieron dos casos de carga, cuya aplicación en el modelo numérico se describe más adelante. La aplicación específica de cada caso en el modelo numérico puede consultarse en el ANEXO I.

- Carga Muerta (DL): Corresponde al peso propio de los elementos estructurales, así como a la sobrecarga permanente aplicada sobre la losa de entrepiso. El software SAP2000 permite calcular automáticamente el peso propio de los elementos, tomando en cuenta la densidad de los materiales. Por otro lado, la sobrecarga se ha asignado de acuerdo con lo especificado en la Tabla VI.8.

Elemento	Espesor	Densidad	Carga total
Piso de loseta cerámica	0.015 m	2,000 kg/m ³	30 kg/m ²
Adhesivo para loseta cerámica	0.015 m	2,000 kg/m ³	30 kg/m ²
Aplanado de yeso	0.020 m	1,500 kg/m ³	30 kg/m ²
Sobrecarga Total:			90 kg/m ²

Tabla VI.8 Sobrecarga muerta considerada en el modelo estructural.

- Carga Viva (LL): Se consideró la carga viva máxima (Wm) para uso residencial, correspondiente a 200kg/m², conforme a lo estipulado por el código municipal de Aguascalientes. Esta carga se asignó como estática lineal. Los detalles de las cargas especificadas en dicho código se pueden consultar en la Tabla VI.9.

ARTICULO 895.- Las cargas vivas unitarias nominales no se considerarán menores que las de la tabla siguiente:

TABLA DE CARGAS VIVAS UNITARIAS

Tipo de Destino	Wm (Kg/m ²)	Wa (Kg/m ²)	W (Kg/m ²)	Observaciones
1) Habitación (Casas Habitación, Departamentos, Dormitorios, Cuartos de Hoteles, Internados, Cuarteles, Cárcel, Correccionales, Hospitales y Similares)	200	90	70	(1)
2) Oficinas, Despachos y Laboratorios	250	180	100	(2)
3) Circulaciones Peatonales (Pasillos, Escaleras, Rampas, Vestíbulos y Pasajes de Acceso Libre al Público).	350	150	40	(3)(4)
4) Estadios, Graderíos, Lugares de Reunión sin Asientos Individuales y salones de baile.	450	350	40	(5)
5) Otros Lugares de Reunión (Templos, Cines, Teatros, Gimnasios, Restaurantes, Áreas de lectura en Bibliotecas, Aulas y Recintos Escolares, Salas de Juego y Similares).	350	250	40	(5)
6) Puentes Peatonales	400	200	40	(5)
7) Comercios, Fábricas, Bodegas y Almacenes	W1	0.9W1	0.8W1	(6)
8) Cubiertas y Azoteas:				
- Pendiente no Mayor de 5%	100	70	15	(4)(7)(9)
- Pendiente del 6 al 10%	60	30	10	(4)(7)(8)(9)
- Pendiente del 11 al 20%	40	20	5	(4)(7)(8)(9)
- Pendiente mayor de 20%	30	20	5	(4)(7)(8)(9)
9) Volados en vía Pública (Marquesinas, Balcones y Similares)	300	70	15	(4)
10) Cochertas y Estacionamientos (para Automóviles Exclusivamente en Losas de Entrepiso o Azoteas con uso de estacionamiento)	300	100	40	(10)

Tabla VI.9 Sobrecarga viva considerada en el modelo estructural.

6.5.2 Análisis Modal

El análisis modal es un paso crucial en este estudio, ya que permite obtener las frecuencias naturales y los modos de vibración que caracterizan la respuesta de la estructura ante cargas dinámicas. En este análisis, se utilizó el método de vectores Ritz, limitando el número de modos considerados a un máximo de 10. Además, se priorizó la evaluación de los modos que afectan principalmente la aceleración vertical ya que las frecuencias de interés corresponden únicamente a las de la losa. La frecuencia registrada corresponde al primer modo cuyo porcentaje de participación de masas en dirección vertical sea más significativo, siendo este el modo que contribuye

de manera predominante a la respuesta vertical de la losa. Los detalles específicos de la configuración modal pueden consultarse en el ANEXO J.

6.6 Calibración y validación del modelo

Como se mencionó en el capítulo IV, el proceso de validación se centró en la comparación de las frecuencias naturales de la losa determinadas mediante mediciones experimentales, con las frecuencias obtenidas en el modelo numérico (véase Figura VI.5 y ANEXO K)

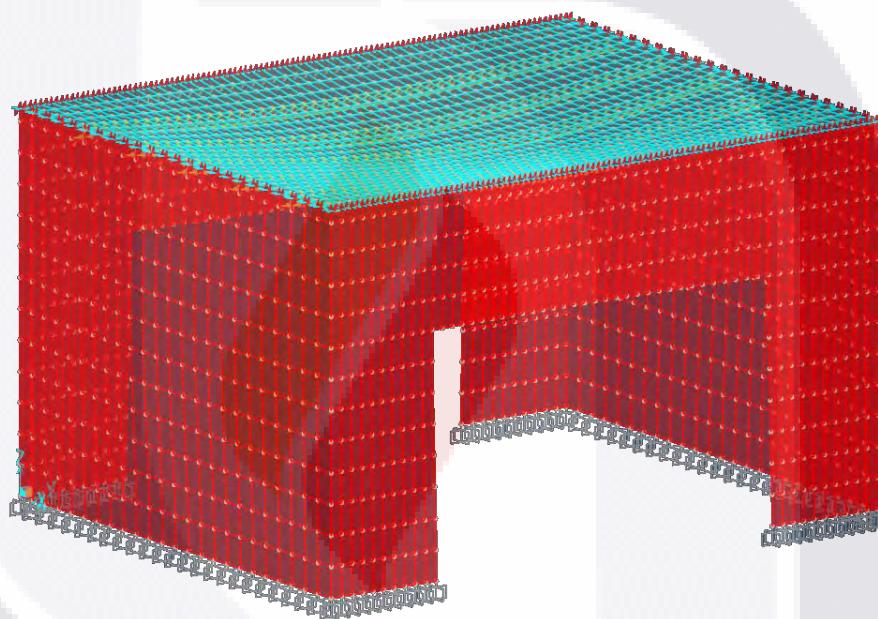


TABLE: Modal Participating Mass Ratios																
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ	
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL-RITZ	Mode	1	0.108294	1.302E-12	7.183E-12	0.201059	1.302E-12	7.183E-12	0.201059	6.487E-13	2.379E-12	1.239E-14	6.487E-13	2.379E-12	1.239E-14	
MODAL-RITZ	Mode	2	0.099991	0.028952	0.743842	4.327E-12	0.028952	0.743842	0.201059	0.025383	0.000441	5.116E-11	0.025383	0.000441	5.117E-11	
MODAL-RITZ	Mode	3	0.097533	4.291E-12	1.852E-11	0.020369	0.028952	0.743842	0.221428	6.846E-13	1.999E-13	1.759E-15	0.025383	0.000441	5.117E-11	
MODAL-RITZ	Mode	4	0.059381	1.812E-11	7.529E-13	0.011632	0.028952	0.743842	0.233059	8.665E-16	6.806E-10	5.193E-15	0.025383	0.000441	5.118E-11	
MODAL-RITZ	Mode	5	0.040586	4.91E-08	6.935E-09	0.061588	0.028952	0.743842	0.294648	5.021E-10	0.000001403	9.659E-11	0.025383	0.000443	1.478E-10	
MODAL-RITZ	Mode	6	0.036501	0.000026	0.000004068	0.00097	0.028978	0.743846	0.295618	2.223E-07	0.000718	2.994E-08	0.025383	0.001161	3.009E-08	
MODAL-RITZ	Mode	7	0.027052	0.000003421	6.417E-07	0.13376	0.028981	0.743847	0.429378	2.907E-08	0.000092	1.931E-09	0.025383	0.001253	3.202E-08	
MODAL-RITZ	Mode	8	0.020408	0.000037	0.000007544	0.14611	0.029019	0.743854	0.575488	3.399E-07	0.000991	1.75E-08	0.025383	0.002244	4.952E-08	
MODAL-RITZ	Mode	9	0.015506	0.000041	0.000008526	0.269331	0.02906	0.743863	0.844819	3.814E-07	0.00107	1.772E-08	0.025384	0.003314	6.724E-08	
MODAL-RITZ	Mode	10	0.008099	0.000086	0.000019	0.104951	0.029146	0.743881	0.94977	8.245E-07	0.002234	3.499E-08	0.025385	0.005548	1.022E-07	

Figura VI.5 Obtención de la frecuencia natural del modelo de SAP 2000

6.7 Generación de nuevos modelos

Una vez calibrado y validado el modelo numérico base, se generaron nuevos modelos con el objetivo de analizar la influencia de las variaciones geométricas en la frecuencia natural de la losa. Esta etapa buscó determinar la sensibilidad del comportamiento dinámico del sistema ante cambios en sus dimensiones principales, manteniendo constantes las condiciones estructurales (como los tipos de apoyos y cargas aplicadas) y las propiedades del material.

6.7.1 Metodología de generación

A partir del modelo calibrado, se desarrolló una serie de configuraciones numéricas variando únicamente las dimensiones en planta de la losa (largo y ancho), manteniendo invariables el espesor, las propiedades de los materiales, las condiciones de apoyo, las cargas aplicadas y el tipo de análisis.

Las variaciones geométricas se definieron de manera sistemática mediante incrementos constantes, con el fin de garantizar una comparación coherente entre los distintos casos. En particular, el ancho de la losa se incrementó en 0.7 m, desde 2.8 m hasta 6.0 m, mientras que el largo se modificó en pasos de 0.4 m, abarcando un rango entre 3.2 m y 6.0 m. Estas configuraciones permitieron explorar un conjunto representativo de 48 modelos dentro de las dimensiones estándar utilizadas en losas de vigueta y bovedilla para vivienda de tipo medio y de interés social.

Cada modelo se analizó mediante el procedimiento modal descrito en el apartado 6.5.2, con el fin de evaluar la influencia de la geometría sobre el comportamiento dinámico de la losa. Los resultados obtenidos se presentarán y discutirán en el capítulo correspondiente de resultados.

6.8 Evaluación de la vibración en losas

Con los modelos numéricos generados, se procedió a evaluar la aceleración máxima de las losas utilizando la metodología empleada en la guía de diseño 11 del AISC (Murray et al., 2003).

Esta metodología permite determinar si la losa cumple con los criterios de confort ante excitaciones dinámicas, considerando su frecuencia natural y el nivel de amortiguamiento estructural. La aceleración máxima inducida por la excitación se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0.35f_n)}{\beta W}$$

donde:

a_p/g = Aceleración máxima, debida a la excitación por caminata como fracción de la aceleración de la gravedad

P_0 = Fuerza constante que representa la excitación (kg)

W = Masa efectiva de la losa (kg)

β = Amortiguamiento estructural

f_n = Frecuencia natural de la losa (Hz)

La Tabla VI.10 presenta los valores recomendados por la normativa AISC para la fuerza constante P_0 y los límites permisibles de aceleración a_p/g según el tipo de uso de la estructura. En este estudio se consideraron los parámetros correspondientes a oficinas, residencias e iglesias.

La frecuencia natural (f_n) y la masa efectiva (W) se determinaron a partir de los modelos numéricos previamente desarrollados en el presente estudio, incorporando los modos de vibración predominantes.

La evaluación consiste en comparar la aceleración máxima calculada con el límite permisible para uso residencial. En caso de que el valor obtenido se aproxime o supere el límite establecido, esto indicaría que la losa podría experimentar vibraciones perceptibles, lo cual requiere un análisis dinámico más detallado para caracterizar completamente el comportamiento vibratorio de la estructura y determinar su estatus dinámico en función de su frecuencia natural y las condiciones de carga.

Para estructurar la información de manera sistemática, se adoptó el siguiente procedimiento:

Se seleccionó un valor de ancho (B) y se evaluaron los distintos valores de largo (L), registrando el correspondiente valor de a_0/g . Este procedimiento se repitió aumentando B en pasos de 0.5 m hasta alcanzar 6.0 m, obteniendo así un conjunto completo de resultados para diversas combinaciones de dimensiones.

Table 4.1 Recommended Values of Parameters in Equation (4.1) and a_0/g Limits			
	Constant Force P_o	Damping Ratio β	Acceleration Limit $a_0/g \times 100\%$
Offices, Residences, Churches	0.29 kN (65 lb)	0.02–0.05*	0.5%
Shopping Malls	0.29 kN (65 lb)	0.02	1.5%
Footbridges—Indoor	0.41 kN (92 lb)	0.01	1.5%
Footbridges—Outdoor	0.41 kN (92 lb)	0.01	5.0%

* 0.02 for floors with few non-structural components (ceilings, ducts, partitions, etc.) as can occur in open work areas and churches,
0.03 for floors with non-structural components and furnishings, but with only small demountable partitions,
typical of many modular office areas,
0.05 for full height partitions between floors.

Tabla VI.10 Valores recomendados de parámetros para la fórmula AISC de vibraciones de pisos
(adaptado de (Murray et al., 2003) Tabla 4.1)

6.9 Representación gráfica de la frontera de vibración

Para facilitar la interpretación de los resultados de la evaluación de vibraciones de las losas, se desarrolló un procedimiento en dos etapas: organización de datos y visualización gráfica mediante Python.

6.9.1 Generación de matriz de vibraciones

A partir de las tablas individuales, se creó una matriz bidimensional donde las filas corresponden a los distintos valores de ancho (B) y las columnas a los valores de largo (L), y cada celda contiene su valor de ap/g . Este formato permite observar de manera inmediata la relación entre las dimensiones de la losa y la intensidad de vibración, así como identificar combinaciones cercanas o superiores al límite permisible de 0.005.

6.9.2 Visualización de la frontera de vibración

A partir de la matriz de aceleraciones, se desarrolló un código en Python para generar un mapa de calor que muestra la frontera entre las losas que cumplen con el criterio de confort vibratorio y aquellas que podrían requerir un análisis dinámico más detallado.

El procedimiento incluyó:

Interpolación de datos: Se utilizó RegularGridInterpolator para obtener una superficie continua de ap/g sobre un rango fino de dimensiones B y L , permitiendo estimar valores intermedios.

Generación de malla fina: Se creó una malla de 300×300 puntos para una alta resolución de la superficie interpolada.

Determinación de la frontera crítica: Se identificaron los puntos donde $a_p/g \approx 0.005$, representando la transición entre lasas seguras y las que podrían experimentar vibraciones perceptibles.

Creación del mapa de calor: Se empleó un colormap centrado en 0.005 para resaltar visualmente las zonas críticas y seguras, y se añadió una línea negra que delimita la frontera de interés.

Este gráfico permite identificar rápida y visualmente las combinaciones de dimensiones de las lasas que podrían ser sensibles a vibraciones.

6.9.3 Comparación de fronteras según tipo de concreto

Adicionalmente, se desarrolló un segundo modelo variando el tipo de concreto, a un concreto clase 2 (véase Tabla VI.5), representativo de construcciones residenciales de tipo medio y de interés social. Este conjunto de modelos fue desarrollado de manera similar al anterior, generando un total de 48 modelos adicionales, lo que eleva el número total de modelos a 96. El mismo procedimiento de interpolación y generación de mapas de calor se aplicó para este nuevo material, obteniendo una segunda gráfica de frontera de vibración. Posteriormente, se compararon las fronteras de cada caso (Clase 1A y Clase 2) en una gráfica combinada, lo que permitió visualizar directamente el efecto del tipo de concreto sobre la susceptibilidad de las lasas a vibraciones perceptibles y facilitar la identificación de las zonas críticas según el tipo de concreto utilizado.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



CAPITULO VI:



RESULTADOS

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPITULO VII. Resultados y Discusiones

7.1 Resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante la campaña experimental realizada sobre las losas de vigueta y bovedilla. Las mediciones se realizaron utilizando acelerómetros para capturar las vibraciones inducidas por cargas dinámicas controladas.

7.1.1 Frecuencias naturales

Las frecuencias naturales de cada losa se determinaron a partir de las señales de aceleración medidas en los distintos puntos de la superficie. La Tabla VII.1 resume los valores obtenidos para las losas bajo las condiciones de prueba establecidas.

Frecuencias Experimentales			
1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	Promedio (Hz)
11.7	12.1	12.1	11.97

Tabla VII.1 Frecuencias experimentales registradas

Para visualizar la distribución de frecuencias, la Figura VII.1 muestra las gráficas de amplitud frente a frecuencia obtenidas mediante transformada rápida de Fourier (FFT) de los registros de aceleración.

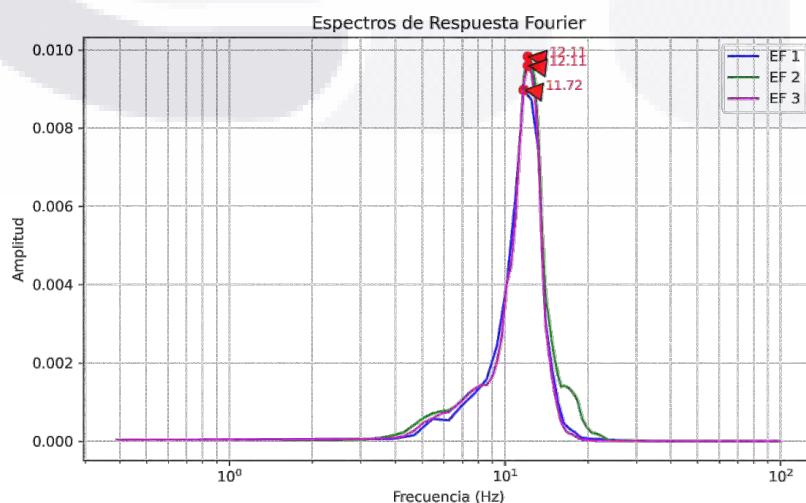


Figura VII.1 Comparación del espectro de respuesta de Fourier de losas medidas en campo

7.1.2 Porcentaje de amortiguamiento

El porcentaje de amortiguamiento se calculó utilizando los registros de aceleración en función del tiempo, aplicando el método de decrecimiento logarítmico. La Tabla VII.2 resume los resultados obtenidos para cada losa.

Amortiguamiento Experimental			
1	2	3	Promedio
(%)	(%)	(%)	(%)
3.30%	3.24%	3.55%	3.36%

Tabla VII.2 Porcentaje de amortiguamiento de losas

Las gráficas de amortiguamiento frente al tiempo se presentan en la Figura VII.2, Figura VII.3 y Figura VII.4, evidenciando que los valores se mantienen relativamente constantes, independientemente de las cargas aplicadas.

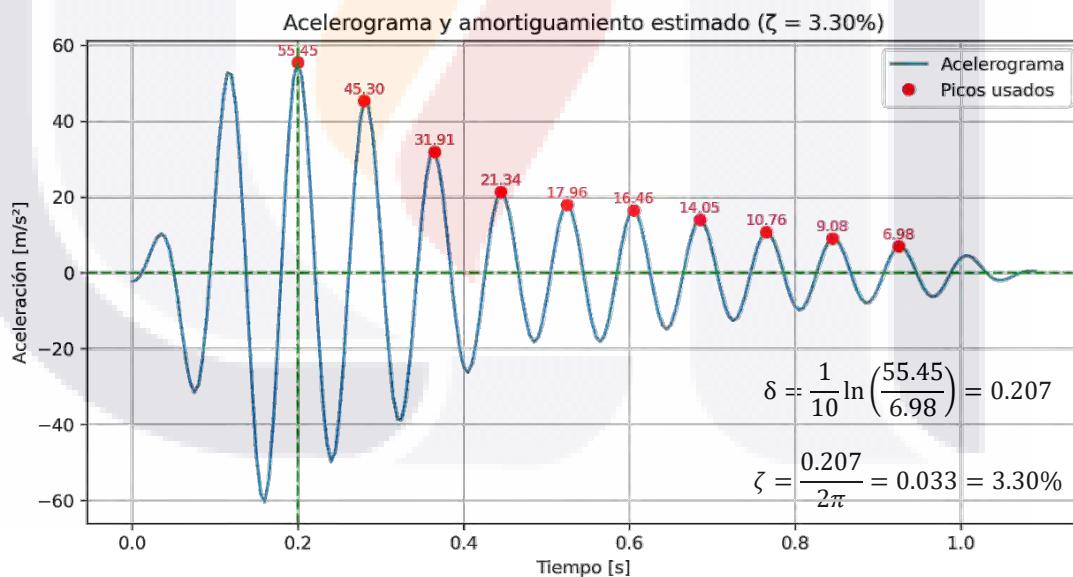


Figura VII.2 Acelerograma y amortiguamiento esperado de losa 1

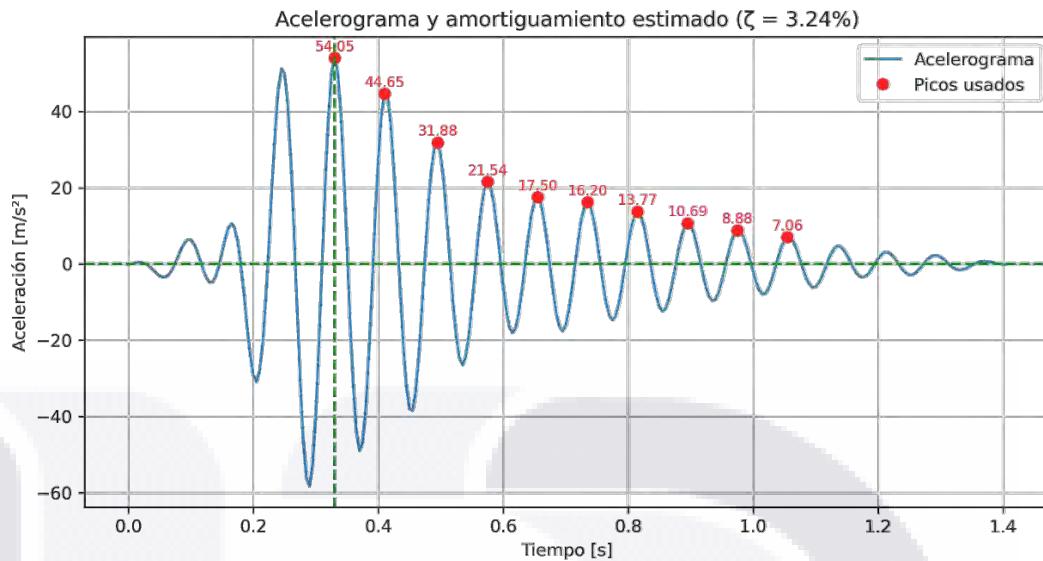


Figura VII.3 Acelerograma y amortiguamiento esperado de losa 2

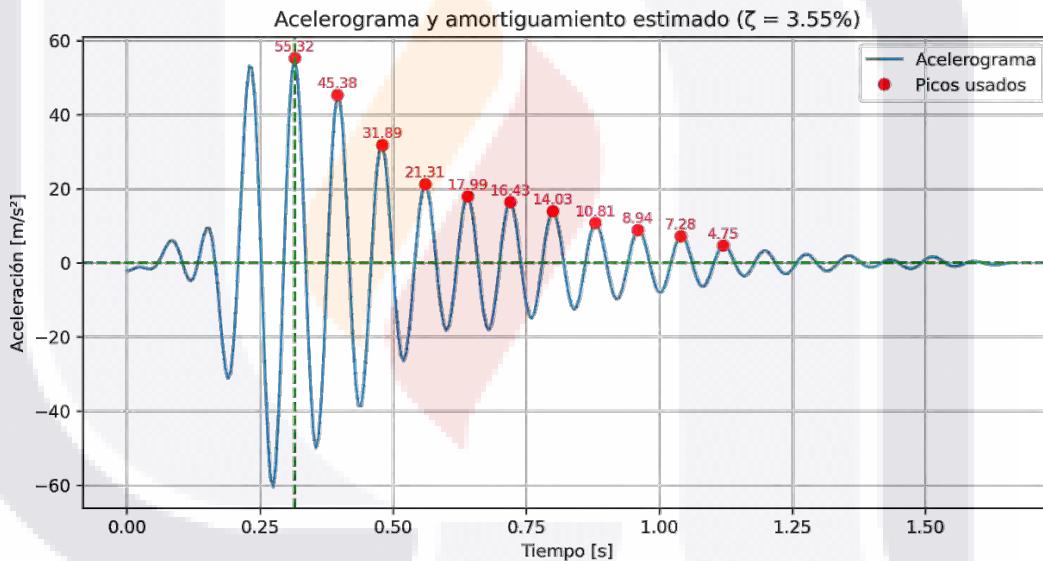


Figura VII.4 Acelerograma y amortiguamiento esperado de losa 3

7.1.3 Observaciones generales

- Se registraron ligeras variaciones en las frecuencias naturales entre las losas, probablemente debido a diferencias en las cargas aplicadas y pequeñas tolerancias constructivas.

- Los porcentajes de amortiguamiento presentan consistencia general, teniendo un promedio de 3.36%, lo que indica un comportamiento dinámico estable de las losas bajo las condiciones experimentales. Sin embargo, para efectos del análisis numérico se utilizó un valor representativo de 3%.
- De acuerdo a las variaciones registradas, se puede asumir que las mediciones permiten establecer una base confiable para la comparación con los resultados del análisis numérico presentado en el Capítulo 6.

7.2 Resultados del análisis numérico

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis numérico de las losas de vigueta y bovedilla. Primero se muestran los resultados del modelo calibrado y validado frente a los datos experimentales; posteriormente se presentan los resultados de la generación de nuevos modelos con variaciones geométricas; finalmente, se evalúa la probabilidad de vibración y cumplimiento de criterios de confort según la guía de diseño 11 del AISC.

7.2.1 Resultados del análisis modal

Se realizaron análisis modales para determinar las frecuencias naturales y los modos de vibración de cada losa, priorizando aquellos modos cuya participación de masas en dirección vertical es significativa, bajo las condiciones establecidas.

La Tabla VII.3 muestra la comparación entre las frecuencias naturales obtenidas experimentalmente y las calculadas mediante el modelo numérico.

Frecuencias Experimentales				Frecuencia Númeroica	Error	
1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	Promedio (Hz)	(Hz)	(Hz)	(%)
11.7	12.1	12.1	11.97	11.19	0.78	6.6%

Tabla VII.3 Comparación de frecuencias naturales: experimental vs. modelo numérico.

7.2.2 Resultados de los nuevos modelos generados

Una vez validado el modelo base, se generó una serie de modelos con variaciones sistemáticas en las dimensiones de la losa (largo y ancho), manteniendo constantes las propiedades de los materiales, espesor, condiciones de apoyo y cargas aplicadas.

Los análisis modales permitieron observar que:

- Aumentar el ancho disminuye ligeramente la frecuencia natural.
- Aumentar el largo reduce la frecuencia natural de forma más significativa.

Estos resultados muestran que el comportamiento dinámico de las losas es sensible a cambios geométricos, especialmente en la dimensión del largo.

La Figura VII.5 presenta la gráfica de la evolución de la frecuencia natural frente a los cambios de ancho y largo

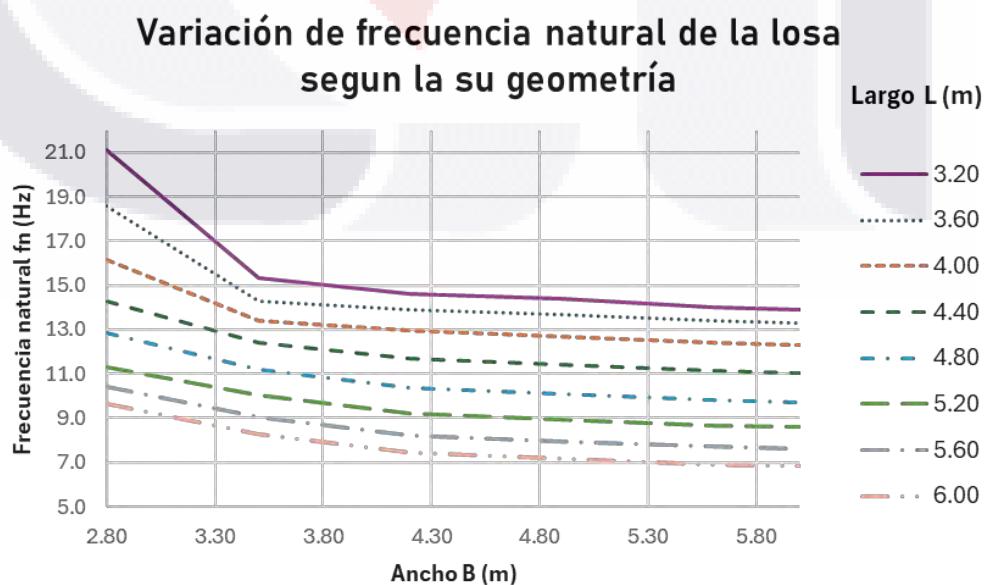


Figura VII.5 Variación de la frecuencia natural de la losa según su geometría

7.2.3 Evaluación de vibraciones de acuerdo a AISC

Utilizando los modelos numéricos generados, se calculó la aceleración máxima inducida por excitaciones de caminata, siguiendo la metodología empleada en la guía de diseño 11 del AISC.

Los parámetros adoptados fueron:

Fuerza constante: $P_0 = 29.56\text{kg}$ (65lb)

Amortiguamiento: $\beta = 0.03$

Límite permisible de aceleración: $a_p/g_{\max} = 0.005$ (0.5% de g)

La frecuencia natural y la masa efectiva se tomaron de los modelos numéricos.

La comparación entre aceleraciones calculadas y límites permisibles permitió identificar los modelos que cumplen con criterios de confort y aquellos que podrían presentar vibraciones perceptibles, requiriendo un análisis más detallado.

Los resultados se presentan en las Tabla VII.4 y Tabla VII.5, donde las losas que exceden los límites permisibles de aceleración se resaltan en color rojo.

B [m]	L [m]	fn [Hz]	Po [Kg]	β	No. Viguetas	w [Kg/m ²]	W [Kg]	ao/g max	ap/g
2.8	3.2	21.13	29.56	0.03	3	219.4	1966	0.005	0.0003
2.8	3.6	18.57	29.56	0.03	3	219.4	2212	0.005	0.0007
2.8	4.0	16.18	29.56	0.03	3	219.4	2458	0.005	0.0014
2.8	4.4	14.27	29.56	0.03	3	219.4	2703	0.005	0.0025
2.8	4.8	12.86	29.56	0.03	3	219.4	2949	0.005	0.0037
2.8	5.2	11.33	29.56	0.03	3	219.4	3195	0.005	0.0059
2.8	5.6	10.43	29.56	0.03	3	219.4	3441	0.005	0.0074
2.8	6.0	9.68	29.56	0.03	3	219.4	3686	0.005	0.0090
3.5	3.2	15.32	29.56	0.03	4	221.7	2483	0.005	0.0019
3.5	3.6	14.31	29.56	0.03	4	221.7	2793	0.005	0.0024
3.5	4.0	13.39	29.56	0.03	4	221.7	3103	0.005	0.0029
3.5	4.4	12.42	29.56	0.03	4	221.7	3414	0.005	0.0037
3.5	4.8	11.19	29.56	0.03	4	221.7	3724	0.005	0.0053
3.5	5.2	10.04	29.56	0.03	4	221.7	4034	0.005	0.0073
3.5	5.6	9.08	29.56	0.03	4	221.7	4344	0.005	0.0095
3.5	6.0	8.28	29.56	0.03	4	221.7	4655	0.005	0.0117
4.2	3.2	14.64	29.56	0.03	5	223.1	2999	0.005	0.0020
4.2	3.6	13.90	29.56	0.03	5	223.1	3374	0.005	0.0023
4.2	4.0	12.94	29.56	0.03	5	223.1	3749	0.005	0.0028
4.2	4.4	11.69	29.56	0.03	5	223.1	4124	0.005	0.0040
4.2	4.8	10.37	29.56	0.03	5	223.1	4499	0.005	0.0058
4.2	5.2	9.21	29.56	0.03	5	223.1	4873	0.005	0.0080
4.2	5.6	8.24	29.56	0.03	5	223.1	5248	0.005	0.0105
4.2	6.0	7.44	29.56	0.03	5	223.1	5623	0.005	0.0130
4.9	3.2	14.39	29.56	0.03	6	224.2	3516	0.005	0.0018
4.9	3.6	13.70	29.56	0.03	6	224.2	3955	0.005	0.0021
4.9	4.0	12.71	29.56	0.03	6	224.2	4394	0.005	0.0026
4.9	4.4	11.41	29.56	0.03	6	224.2	4834	0.005	0.0038
4.9	4.8	10.09	29.56	0.03	6	224.2	5273	0.005	0.0055
4.9	5.2	8.93	29.56	0.03	6	224.2	5713	0.005	0.0076
4.9	5.6	7.97	29.56	0.03	6	224.2	6152	0.005	0.0099
4.9	6.0	7.16	29.56	0.03	6	224.2	6592	0.005	0.0122
5.6	3.2	14.04	29.56	0.03	7	225.0	4032	0.005	0.0018
5.6	3.6	13.42	29.56	0.03	7	225.0	4536	0.005	0.0020
5.6	4.0	12.43	29.56	0.03	7	225.0	5040	0.005	0.0025
5.6	4.4	11.13	29.56	0.03	7	225.0	5544	0.005	0.0036
5.6	4.8	9.82	29.56	0.03	7	225.0	6048	0.005	0.0052
5.6	5.2	8.67	29.56	0.03	7	225.0	6552	0.005	0.0072
5.6	5.6	7.71	29.56	0.03	7	225.0	7056	0.005	0.0094
5.6	6.0	6.90	29.56	0.03	7	225.0	7560	0.005	0.0116
6.0	3.2	13.89	29.56	0.03	8	227.6	4370	0.005	0.0017
6.0	3.6	13.29	29.56	0.03	8	227.6	4916	0.005	0.0019
6.0	4.0	12.32	29.56	0.03	8	227.6	5462	0.005	0.0024
6.0	4.4	11.03	29.56	0.03	8	227.6	6009	0.005	0.0035
6.0	4.8	9.73	29.56	0.03	8	227.6	6555	0.005	0.0050
6.0	5.2	8.59	29.56	0.03	8	227.6	7101	0.005	0.0069
6.0	5.6	7.63	29.56	0.03	8	227.6	7647	0.005	0.0089
6.0	6.0	6.82	29.56	0.03	8	227.6	8194	0.005	0.0110

Tabla VII.4 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al., (2003), para un concreto clase 1A $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$

B [m]	L [m]	fn [Hz]	Po [Kg]	β	No. Viguetas	w [Kg/m ²]	W [Kg]	ao/g max	ap/g
2.8	3.2	19.88	29.56	0.03	3	219.4	1966	0.005	0.0005
2.8	3.6	16.97	29.56	0.03	3	219.4	2212	0.005	0.0012
2.8	4.0	13.42	29.56	0.03	3	219.4	2458	0.005	0.0037
2.8	4.4	12.31	29.56	0.03	3	219.4	2703	0.005	0.0049
2.8	4.8	11.01	29.56	0.03	3	219.4	2949	0.005	0.0071
2.8	5.2	9.89	29.56	0.03	3	219.4	3195	0.005	0.0097
2.8	5.6	8.97	29.56	0.03	3	219.4	3441	0.005	0.0124
2.8	6.0	8.23	29.56	0.03	3	219.4	3686	0.005	0.0150
3.5	3.2	15.17	29.56	0.03	4	221.7	2483	0.005	0.0020
3.5	3.6	14.10	29.56	0.03	4	221.7	2793	0.005	0.0025
3.5	4.0	12.90	29.56	0.03	4	221.7	3103	0.005	0.0035
3.5	4.4	11.44	29.56	0.03	4	221.7	3414	0.005	0.0053
3.5	4.8	10.09	29.56	0.03	4	221.7	3724	0.005	0.0077
3.5	5.2	8.96	29.56	0.03	4	221.7	4034	0.005	0.0106
3.5	5.6	8.03	29.56	0.03	4	221.7	4344	0.005	0.0136
3.5	6.0	7.27	29.56	0.03	4	221.7	4655	0.005	0.0166
4.2	3.2	14.62	29.56	0.03	5	223.1	2999	0.005	0.0020
4.2	3.6	13.67	29.56	0.03	5	223.1	3374	0.005	0.0024
4.2	4.0	12.37	29.56	0.03	5	223.1	3749	0.005	0.0035
4.2	4.4	10.89	29.56	0.03	5	223.1	4124	0.005	0.0053
4.2	4.8	9.56	29.56	0.03	5	223.1	4499	0.005	0.0077
4.2	5.2	8.45	29.56	0.03	5	223.1	4873	0.005	0.0105
4.2	5.6	7.53	29.56	0.03	5	223.1	5248	0.005	0.0135
4.2	6.0	6.77	29.56	0.03	5	223.1	5623	0.005	0.0164
4.9	3.2	14.14	29.56	0.03	6	224.2	3516	0.005	0.0020
4.9	3.6	13.28	29.56	0.03	6	224.2	3955	0.005	0.0024
4.9	4.0	11.99	29.56	0.03	6	224.2	4394	0.005	0.0034
4.9	4.4	10.55	29.56	0.03	6	224.2	4834	0.005	0.0051
4.9	4.8	9.24	29.56	0.03	6	224.2	5273	0.005	0.0074
4.9	5.2	8.14	29.56	0.03	6	224.2	5713	0.005	0.0100
4.9	5.6	7.23	29.56	0.03	6	224.2	6152	0.005	0.0128
4.9	6.0	6.47	29.56	0.03	6	224.2	6592	0.005	0.0155
5.6	3.2	13.78	29.56	0.03	7	225.0	4032	0.005	0.0020
5.6	3.6	12.97	29.56	0.03	7	225.0	4536	0.005	0.0023
5.6	4.0	11.73	29.56	0.03	7	225.0	5040	0.005	0.0032
5.6	4.4	10.31	29.56	0.03	7	225.0	5544	0.005	0.0048
5.6	4.8	9.03	29.56	0.03	7	225.0	6048	0.005	0.0069
5.6	5.2	7.94	29.56	0.03	7	225.0	6552	0.005	0.0093
5.6	5.6	7.03	29.56	0.03	7	225.0	7056	0.005	0.0119
5.6	6.0	6.28	29.56	0.03	7	225.0	7560	0.005	0.0145
6.0	3.2	13.63	29.56	0.03	8	227.6	4370	0.005	0.0019
6.0	3.6	12.85	29.56	0.03	8	227.6	4916	0.005	0.0022
6.0	4.0	11.63	29.56	0.03	8	227.6	5462	0.005	0.0031
6.0	4.4	10.24	29.56	0.03	8	227.6	6009	0.005	0.0046
6.0	4.8	8.96	29.56	0.03	8	227.6	6555	0.005	0.0065
6.0	5.2	7.88	29.56	0.03	8	227.6	7101	0.005	0.0088
6.0	5.6	6.97	29.56	0.03	8	227.6	7647	0.005	0.0112
6.0	6.0	6.22	29.56	0.03	8	227.6	8194	0.005	0.0136

Tabla VII.5 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003) para un concreto clase 2 f'c =200kg/cm2

7.2.4 Representación de la frontera de vibración

Para facilitar la interpretación de los resultados, se construyó la matriz bidimensional de aceleraciones máximas ap/g presentada en las Tabla VII.6 y Tabla VII.7 donde las filas corresponden a los valores de ancho y las columnas a los valores de largo de las losas.

		Largo (L) [m]							
		3.20	3.60	4.00	4.40	4.80	5.20	5.60	6.00
Ancho (B) [m]	2.80	0.0003	0.0007	0.0014	0.0025	0.0037	0.0059	0.0074	0.0090
	3.50	0.0019	0.0024	0.0029	0.0037	0.0053	0.0073	0.0095	0.0117
	4.20	0.0020	0.0023	0.0028	0.0040	0.0058	0.0080	0.0105	0.0130
	4.90	0.0018	0.0021	0.0026	0.0038	0.0055	0.0076	0.0099	0.0122
	5.60	0.0018	0.0020	0.0025	0.0036	0.0052	0.0072	0.0094	0.0116

Tabla VII.6 Matriz de límites de confort de confort de acuerdo a (Murray et al., 2003), para un concreto clase 1A $f'c = 250\text{kg/cm}^2$

		Largo (L) [m]							
		3.20	3.60	4.00	4.40	4.80	5.20	5.60	6.00
Ancho (B) [m]	2.80	0.0005	0.0012	0.0037	0.0049	0.0071	0.0097	0.0124	0.0150
	3.50	0.0020	0.0025	0.0035	0.0053	0.0077	0.0106	0.0136	0.0166
	4.20	0.0020	0.0024	0.0035	0.0053	0.0077	0.0105	0.0135	0.0164
	4.90	0.0020	0.0024	0.0034	0.0051	0.0074	0.0100	0.0128	0.0155
	5.60	0.0020	0.0023	0.0032	0.0048	0.0069	0.0093	0.0119	0.0145
	6.00	0.0019	0.0022	0.0031	0.0046	0.0065	0.0088	0.0112	0.0136

Tabla VII.7 Matriz de límites de confort de confort de acuerdo a (Murray et al., 2003), para un concreto clase 2 $f'c = 200\text{kg/cm}^2$

A partir de esta matriz, se generaron mapas de calor mediante interpolación para identificar las zonas que exceden los límites de vibración permitidos por la normativa, las Figura VII.6 muestra el mapa de calor para un concreto clase 1A de 250kg/cm^2 , mientras que la Figura VII.7 representa un concreto clase 2, indicando las zonas seguras y las que podrían superar el límite permisible de confort humano.

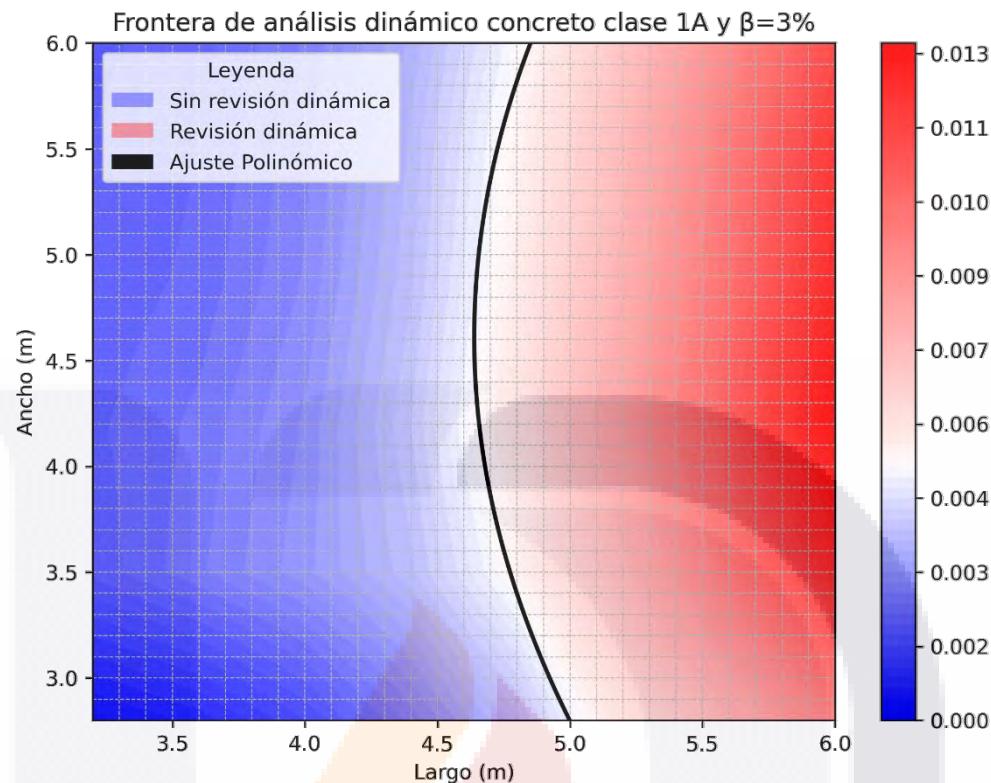


Figura VII.6 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 1A ($f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$)

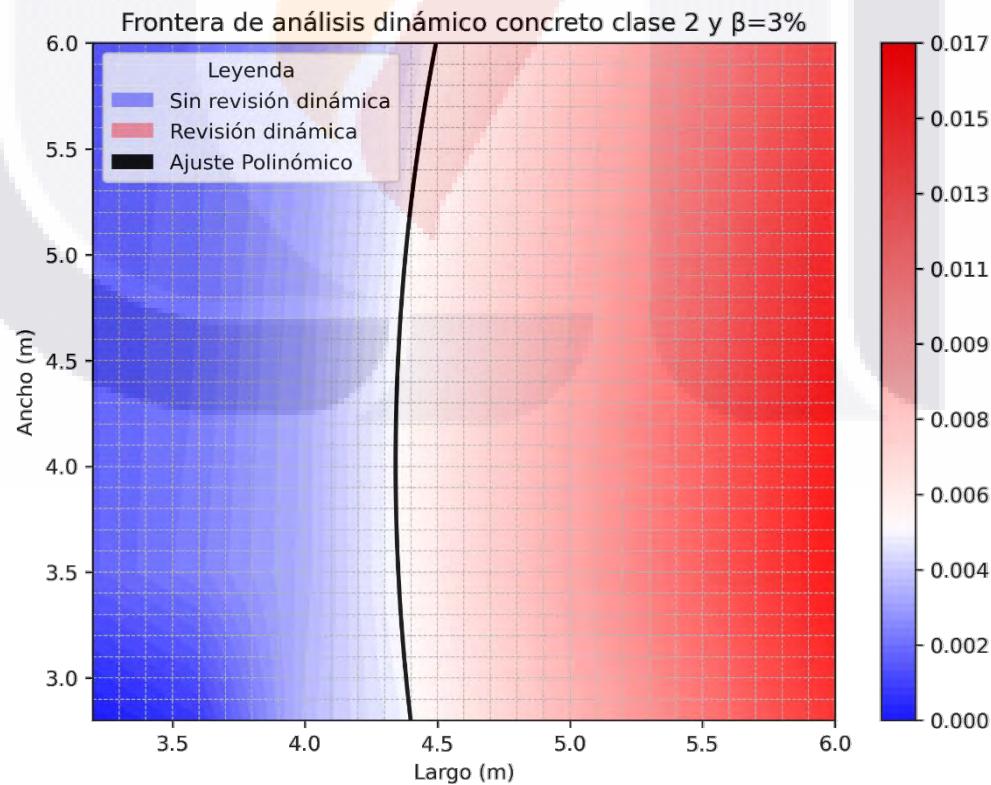


Figura VII.7 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 2 ($f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$)

7.2.5 Frontera de vibración variando el amortiguamiento

Con el fin de evaluar el efecto del porcentaje de amortiguamiento en el comportamiento dinámico de las losas, se repitió el procedimiento descrito en la sección 7.2.5 considerando valores de amortiguamiento del 4% y 5%. Este rango abarca los valores reportados por diversos autores, incluyendo el 5% especificado en la.(NTC CDMX, 2023). Las tablas de cálculos y matrices se pueden consultar en el ANEXO L.

Las Figura VII.8 y Figura VII.9 muestran los mapas de calor para un concreto clase 1A con $E_c=14'000\sqrt{f'_c}$, mientras que las Figura VII.10 y Figura VII.11 corresponden a un concreto clase 2 con $E_c=8'000\sqrt{f'_c}$. Cada gráfica representa los diferentes porcentajes de amortiguamiento analizados.

Las Figura VII.12 y Figura VII.13 presentan una combinación de las fronteras de comportamiento dinámico para ambos tipos de concreto, lo que permite comparar de manera directa los efectos de los distintos porcentajes de amortiguamiento. Este análisis permite identificar la sensibilidad de las losas frente a cambios en el amortiguamiento.

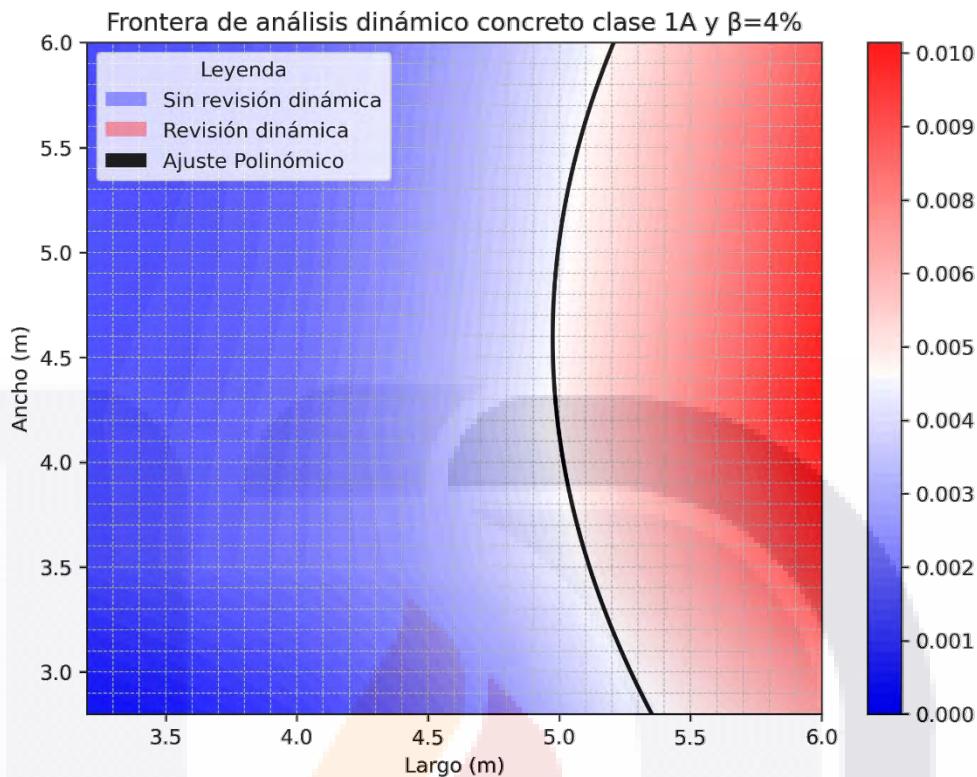


Figura VII.8 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 1A ($f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$) y $\beta=4\%$

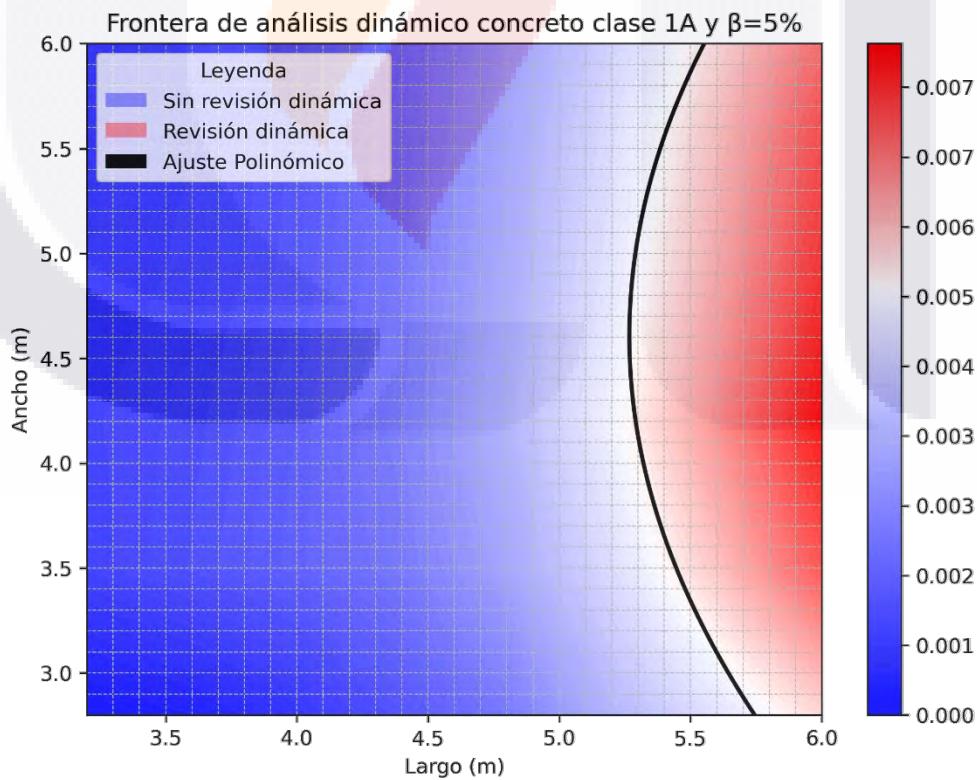


Figura VII.9 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 1A ($f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$) y $\beta=5\%$

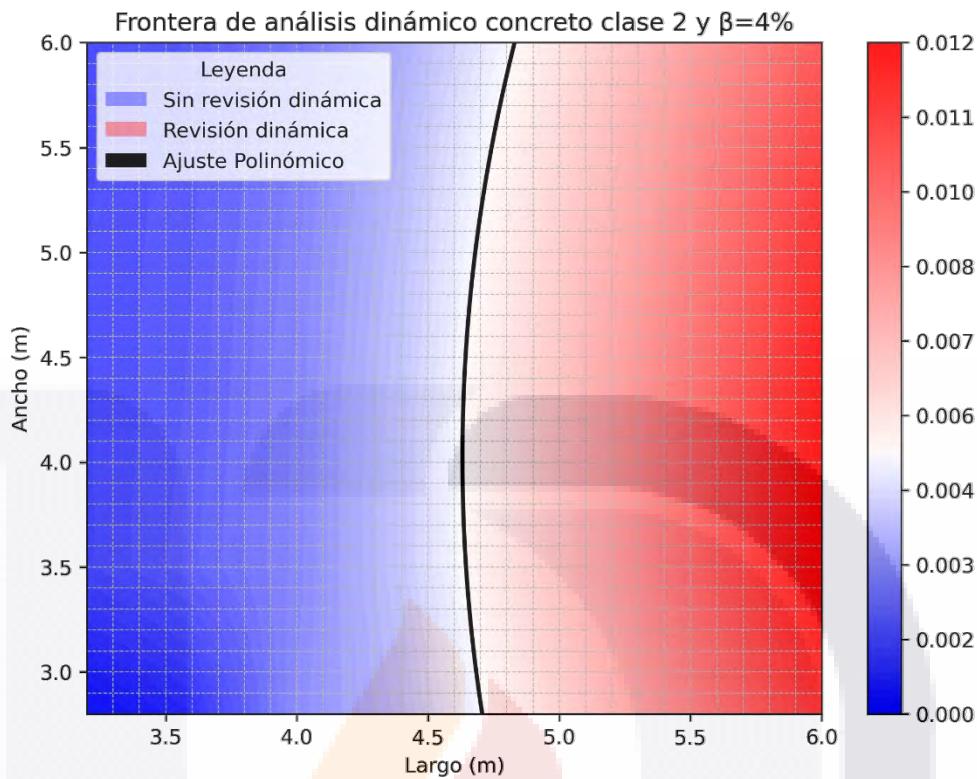


Figura VII.10 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 2 ($f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$) y $\beta=4\%$

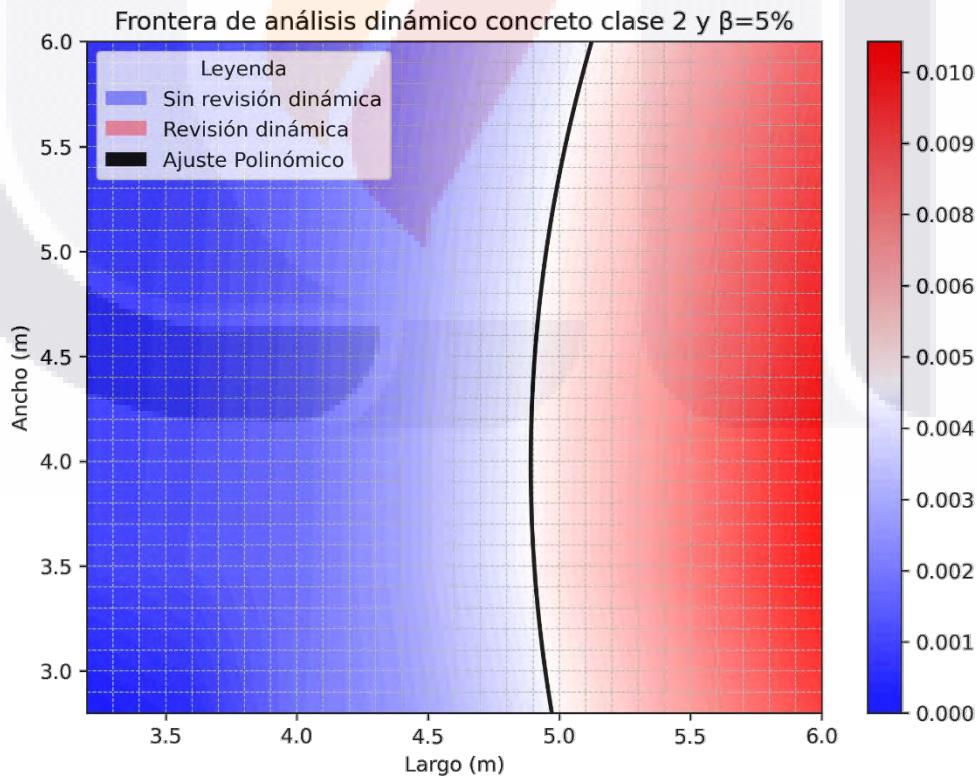


Figura VII.11 Mapa de calor de vibración para losa de concreto clase 2 ($f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$) y $\beta=5\%$

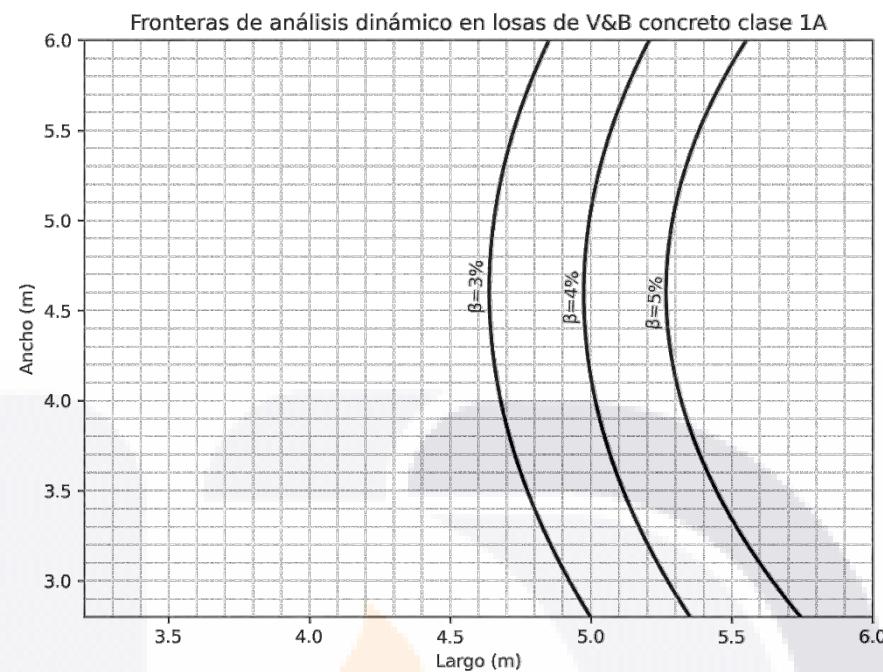


Figura VII.12 Fronteras de comportamiento dinámico para concreto clase A1 ($E_c = 14'000 \sqrt{f'_c}$), para diferentes porcentajes de amortiguamiento

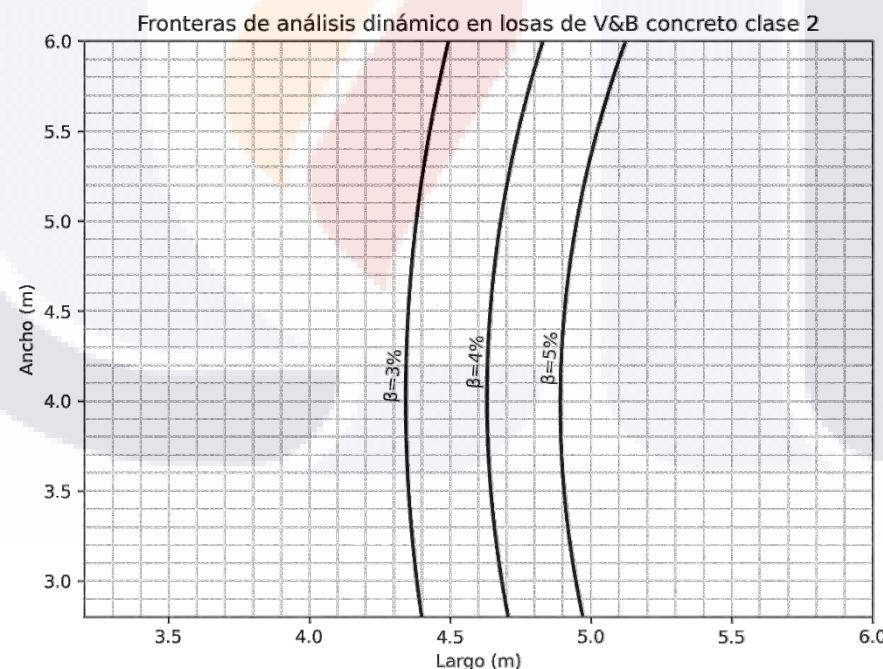


Figura VII.13 Fronteras de comportamiento dinámico para concreto clase 2 ($E_c = 8'000 \sqrt{f'_c}$), para diferentes porcentajes de amortiguamiento

7.3 Discusión general de resultados

Los resultados experimentales y numéricos obtenidos permiten comprender de manera integral el comportamiento dinámico de las losas de vigueta y bovedilla bajo excitaciones de tipo residencial. La comparación entre las frecuencias naturales medidas y las calculadas mostró una concordancia satisfactoria, con discrepancias máximas de 6.60 %, lo que valida el modelo numérico propuesto. Este nivel de ajuste confirma que las condiciones de frontera, propiedades de los materiales y geometría empleadas en la modelación son representativas del sistema físico ensayado. De este modo, el modelo numérico puede considerarse una herramienta confiable para la predicción de la respuesta vibratoria de losas prefabricadas en condiciones de servicio.

El análisis del amortiguamiento indicó valores promedio cercanos al 3.4 %. Para los fines de cálculo y simplificación del modelo, se adoptó un valor constante de 3 %, lo cual permite una aproximación razonable sin comprometer la precisión de los resultados. Adicionalmente, como complemento al análisis principal, se realizaron cálculos considerando amortiguamientos de 4 % y 5 %, con el propósito de evaluar la sensibilidad de la respuesta vibratoria ante variaciones en este parámetro. Estos casos adicionales permitieron corroborar el efecto amortiguador en el confort percibido.

La evaluación de confort conforme a la guía de diseño 11 del AISC permitió establecer que, para un amortiguamiento del 3 %, la mayoría de los modelos cumplen con el límite permisible de aceleración de 0.005g si la longitud de viguetas no excede de 4.60m. No obstante, las losas de mayor longitud o aquellas con concreto clase 2 tienden a acercarse o superar dicho umbral, indicando un potencial incremento en la percepción de vibraciones.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Finalmente, los mapas de calor obtenidos a partir de la interpolación de aceleraciones máximas representan una herramienta visual eficaz para la definición de fronteras geométricas seguras. Estas gráficas permiten identificar combinaciones de largo y ancho que garantizan niveles aceptables de confort, y evidencian el desplazamiento de la frontera crítica al modificar las propiedades del material.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPITULO VII:



CONCLUSIONES

CAPITULO VIII. Conclusiones

8.1 Conclusión general

El presente estudio permitió caracterizar el comportamiento dinámico de losas de vigueta y bovedilla, combinando mediciones experimentales y modelos numéricos validados. Los resultados obtenidos facilitan la toma de decisiones sobre la necesidad de realizar análisis dinámicos en proyectos de ingeniería civil, optimizando el diseño estructural y contribuyendo a una evaluación más eficiente de las losas frente a vibraciones.

8.2 Conclusiones particulares

- Las mediciones mediante el método heel-drop permitieron determinar las frecuencias naturales de las losas y un valor promedio de amortiguamiento cercano al 3 %, proporcionando una base para el análisis dinámico. Como complemento, se realizaron cálculos adicionales para amortiguamientos de 4 % y 5 %
- Los modelos desarrollados, basados en las características geométricas y propiedades de material observadas, mostraron un error promedio de solo 6.60% en las frecuencias naturales respecto a los resultados experimentales, confirmando que representan adecuadamente el comportamiento real del sistema.
- La generación de nuevos modelos permitió evaluar cómo la variación de la geometría y del tipo de concreto afecta las frecuencias naturales de las losas. Se observó que el largo de la losa tiene un efecto más significativo sobre la frecuencia que el ancho, y que un concreto clase 2 reduce las frecuencias naturales, evidenciando la sensibilidad del comportamiento dinámico a estos factores.

- Los análisis de aceleración máxima conforme a la guía de diseño 11 del AISC mostraron que las losas más cortas presentan aceleraciones inferiores al límite permisible de 0.005 g, mientras que las configuraciones más flexibles pueden acercarse o superar este valor. La representación mediante mapas de calor permitió identificar de forma visual las combinaciones de largo y ancho que conducen a niveles de vibración aceptables. Los resultados adicionales con amortiguamientos de 4 % y 5 % indicaron una mejora en el cumplimiento de este límite.
- Se elaboró una guía que relaciona dimensiones de las losas y el tipo de concreto con la necesidad de realizar un análisis dinámico detallado, facilitando decisiones rápidas en proyectos de ingeniería civil.
- Considerando la influencia predominante del largo de la losa sobre la necesidad de análisis dinámico, se propone un criterio práctico para facilitar la toma de decisiones en diseño:
 - ⦿ Para concreto clase 2 de 200kg/cm² se recomienda realizar análisis dinámicos detallados solo si el largo excede aproximadamente 4.40m.
 - ⦿ Para concreto clase 1A de 250kg/cm², este límite se incrementa a aproximadamente 4.60m.

Cabe señalar que los valores antes mencionados se proponen de manera conservadora, considerando un amortiguamiento equivalente del 3 %. Sin embargo, al asumir valores de amortiguamiento mayores, las dimensiones mínimas recomendadas podrían incrementarse hasta en 70 cm, reduciendo así la necesidad de evaluaciones dinámicas detalladas en losas de mayor longitud.

8.2 Recomendaciones

Los resultados y criterios presentados en esta tesis aplican específicamente a losas de vigueta y bovedilla con las dimensiones y características geométricas detalladas en este trabajo (típicas de edificaciones residenciales de tipo medio o de interés social), apoyadas sobre muros de mampostería. Por lo tanto, se recomienda precaución al extrapolar los resultados a otros tipos de losas, sistemas de apoyo o configuraciones estructurales diferentes, ya que las respuestas dinámicas podrían variar significativamente.

Asimismo, se sugiere realizar ensayos complementarios que consideren diferentes condiciones de apoyo, tipos de unión entre viguetas y bovedillas, o variaciones en la rigidez de diafragma, con el fin de evaluar su influencia sobre la respuesta dinámica.

Los mapas de vibración y la guía gráfica elaborados en este trabajo pueden emplearse como herramientas preliminares para identificar rápidamente la necesidad de realizar análisis dinámicos detallados, optimizando tiempo y recursos en proyectos de diseño estructural. No obstante, se recomienda ampliar la guía para cubrir otros rangos de dimensiones, diferentes módulos de elasticidad y condiciones de apoyo, aumentando así su aplicabilidad y confiabilidad en diversos escenarios de ingeniería civil. Finalmente, se sugiere continuar la investigación explorando losas mixtas, diferentes tipos de viguetas y bovedillas, así como la influencia de diferentes valores de amortiguamiento real sobre la respuesta dinámica, con el objetivo de fortalecer y complementar los criterios propuestos en esta tesis.

Bibliografía

- Allen, D. E., & Murray, T. M. (1993). Design Criterion for Vibrations Due to Walking. *Engineering Journal*, 30(4), 117-129. <https://doi.org/10.62913/engj.v30i4.1281>
- Bachmann, H., Ammann, W. J., DELSCHL, F., Eisenmann, J., Floegl, I., Hirsch, G. H., Klein, G. K., Lande, G. J., Mahrenholz, O., Natke, H. G., Nussbaumer, H., PRFTLOVE, A. J., Rainer, J. H., Saemann, E.-U., & STFINBEISSER, L. (1995). *VIBRATION PROBLEMS IN STRUCTURES*.
- BS 6472. (2008). *Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings*.
- Caballero-Garatachea, O., Juárez-Luna, G., & Ruiz Sandoval-Hernández, M. E. (2021). Methods for the vibration analysis of reinforced concrete precast one-way joist slab floor systems under human walking. *Journal of Building Engineering*, 43, 103217. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103217>
- Del Olmo, C. (1986). Técnica electrodinámica para la medida del módulo de elasticidad de los materiales de construcción. (Equipo puesto a punto en el IETcc para la medida del módulo de elasticidad dinámico). *Informes de la Construcción*, 37(379), 21-32. <https://doi.org/10.3989/ic.1986.v37.i379.1770>
- European Commission. (2006). *Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls*.
- HiVoSS. (2008). *Vibration Design of Floors Guideline*.
- Mast, R. F. (2001). *Vibration of Precast Prestressed Concrete Floors*.

Murray, T. M., Allen, D. E., & Ungar, E. E. (2003). *American Institute of Steel Construction. Design Guide 11: Floor Vibrations Due to Human Activity.*

<https://www.aisc.org>

Nguyen, H. A. T. (2013). *Walking induced floor vibration design and control.*

NTC CDMX. (2023). *Normas técnicas complementarias de la Ciudad de México.*

Ordaz, M., Castellanos, F., & Zapata, A. (2005). *Manual de uso del programa DEGTRA A4.*

Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2001). *NOM-024-STPS-2001, Vibraciones- Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo.*

Diario Oficial de la Federación. <https://www.dof.gob.mx/>

Smith, A. L., Hicks, S. J., & Devine, P. J. (2009). *Design of floors for vibration: A new approach* (Revised ed). Steel Construction Institute.

Willford, M., & Young, P. (2006). *A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures.* The Concrete Society Publication CCIP-016.

ANEXO A. FORMULAS PARA CÁLCULO DE FACTOR DE SENSIBILIDAD K DE ACUERDO A (NTC CDMX, 2023).

$$K = \frac{\delta}{2} \frac{f^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_o}\right)^2}}$$

$$\delta = \rho \Delta_s$$

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_e}{f}\right)^2\right]^2 + \left(2\beta \frac{f_e}{f}\right)^2}}$$

$$f = \frac{0.87}{\pi} C \sqrt{\frac{(15a_2^4 + 8a_1^4)E_c h^3}{(a_1 a_2)^3 (m_{losa})}}$$

$$C = 0.83 + 0.43 \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2$$

$$\Delta_{losa} = \frac{w a_1^4}{384 E I_{losa}}$$

Donde:

- K** Factor de sensibilidad
- δ** Amplitud de vibración del elemento estructural [cm]
- ρ** Factor de amplificación dinámica
- f** Frecuencia de vibración [Hz]
- f_o** Frecuencia = 10Hz
- f_e** Frecuencia de excitación = 1.5Hz
- β** Factor de amortiguamiento
- a₁** Claro corto de la losa [cm]
- a₂** Claro largo de la losa [cm]
- C** Parámetro para calcular la frecuencia natural de losas
- Δ_{losa}** Desplazamiento estático de la losa [cm]
- h** Peralte total de la losa [cm]
- E_c** Módulo de elasticidad del concreto [kg/cm²]
- m_{losa}** Masa de la losa [kg]
- w** Carga uniformemente repartida para una franja unitaria de la losa [kg/cm]
- E** Módulo de elasticidad del concreto [kg/cm²]
- I_{losa}** Inercia de la losa [cm⁴]

ANEXO B. Ficha técnica del acelerómetro WT901BLECL5.0

Parámetro	Valor / Descripción
Modelo del dispositivo	WT901BLECL5.0 – WitMotion
Tipo de sensor	Unidad de Medición Inercial (IMU) triaxial (acelerómetro, giroscopio, magnetómetro)
Componente acelerómetro	Triaxial (X, Y, Z)
Rango de medición	±16 g
Precisión	±0.01g
Resolución	16 bits
Estabilidad	±0.005 g
Frecuencias de salida	0.2Hz - 200 Hz
Voltaje de operación	3.3 - 5 V
Corriente típica	< 40 mA
Interfaz de comunicación	Bluetooth 5.0 BLE
Dimensiones físicas	51.3mm × 36mm × 15 mm ±0.2
Peso del módulo	20 gr ±0.2
Referencia técnica	WitMotion. WT901BLECL Data Sheet v23-0420. Recuperado de: www.wit-motion.com

Tabla A. 1 Especificaciones técnicas del módulo WT901BLECL5.0



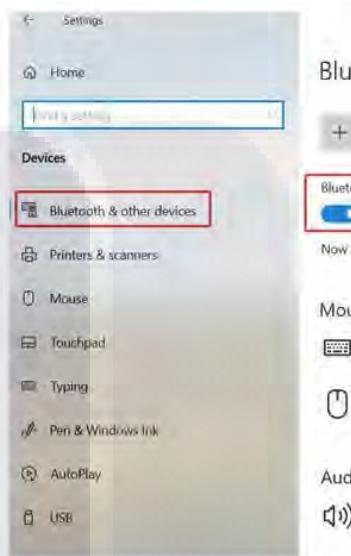
Figura A. 1. Módulo acelerómetro triaxial WT901BLECL5.0 de WitMotion.

ANEXO C. Manual de calibración de acelerómetro WT901BLECL5.0

6 Multiple-Connection Instructions

The WT901BLECL can be connected via laptop's Bluetooth. It is required to use the WitMotion Software. The maximum is up to 4 units in the same time via connection.

PS. It is required to turn on the laptop's Bluetooth.



Bluetooth & other devices

Add Bluetooth or other device

Bluetooth

On

Now discoverable as "COMPUTE"

Mouse, keyboard, & pen

USB Keyboard

USB OPTICAL MOUSE

Audio

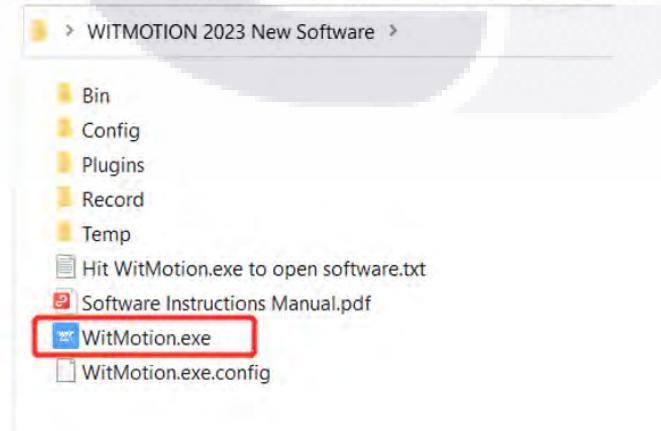
JBL GO 3
Paired

Because Bluetooth is limited, sometimes the data lag when you're using Bluetooth to multi-connect, and the Bluetooth range will be less. Of course, the different phone has a different range.

If you need longer Bluetooth range when multi-connection (up to 30m), please use our BLE 5.0 adapter (refer to the chapter4.1.2 BLE 5.0 Adapter Connection)

6.1 Connection Instructions

1. Open all sensors.
2. Open the WitMotion Software and the laptop's Bluetooth.



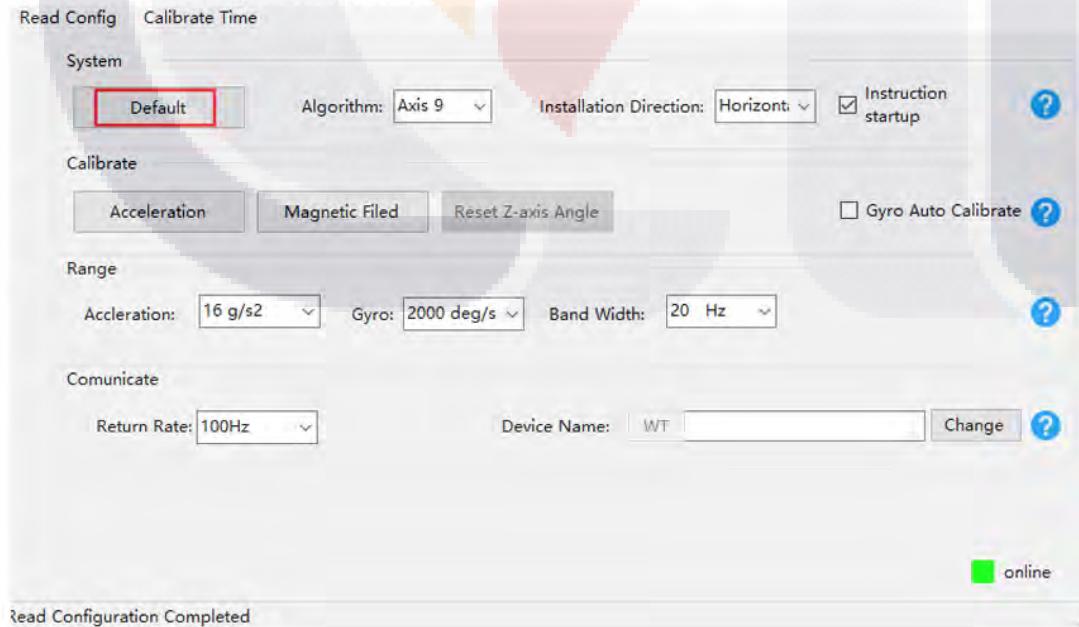
3. Choose module "BWT901BLECL5.0".
 4. Click "Search Device" and the software will automatically search and find a COM. Then you can see the data with ✓ COM.



5.3 Menu of Configuration

5.3.1. Factory reset

When the sensor is online, click the "Configuration" tab and click "Default" in the sensor configuration interface.



5.3.6 Gyro Auto Calibrate

The gyroscope calibration is to calibrate the angular velocity, and the sensor will calibrate automatically.

It is recommended that the automatic calibration of gyroscopes can be inactivated only if the module rotates at a constant speed.

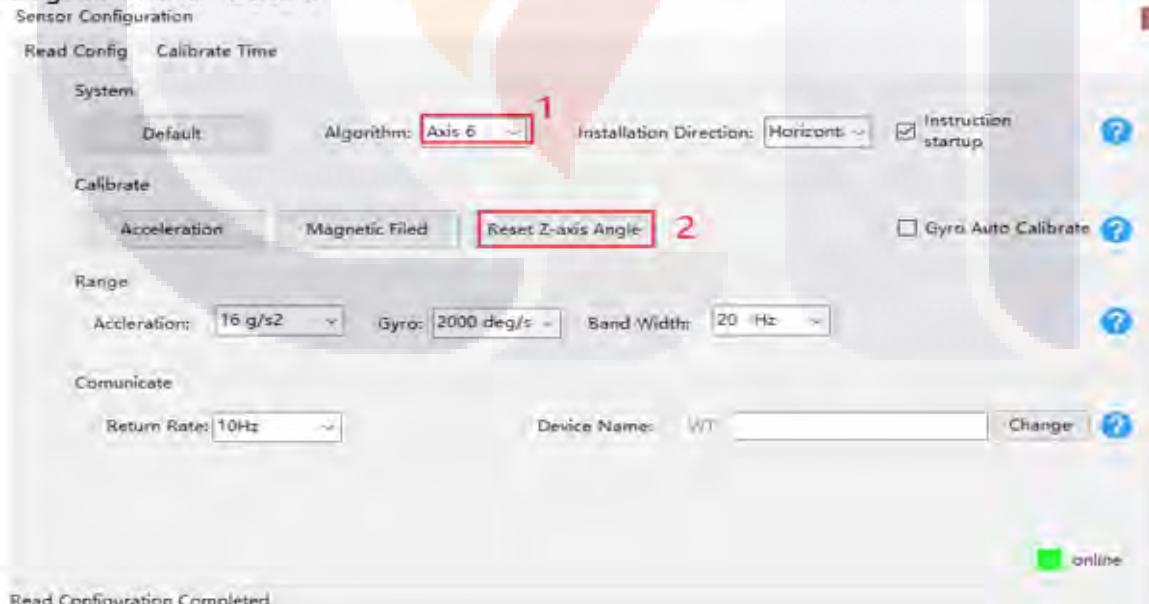
5.3.7 Reset Z-axis Angle

Note : If you want to avoid magnetic interference, you can change the algorithm to 6-axis, function of resetting Z-axis angle can be used.

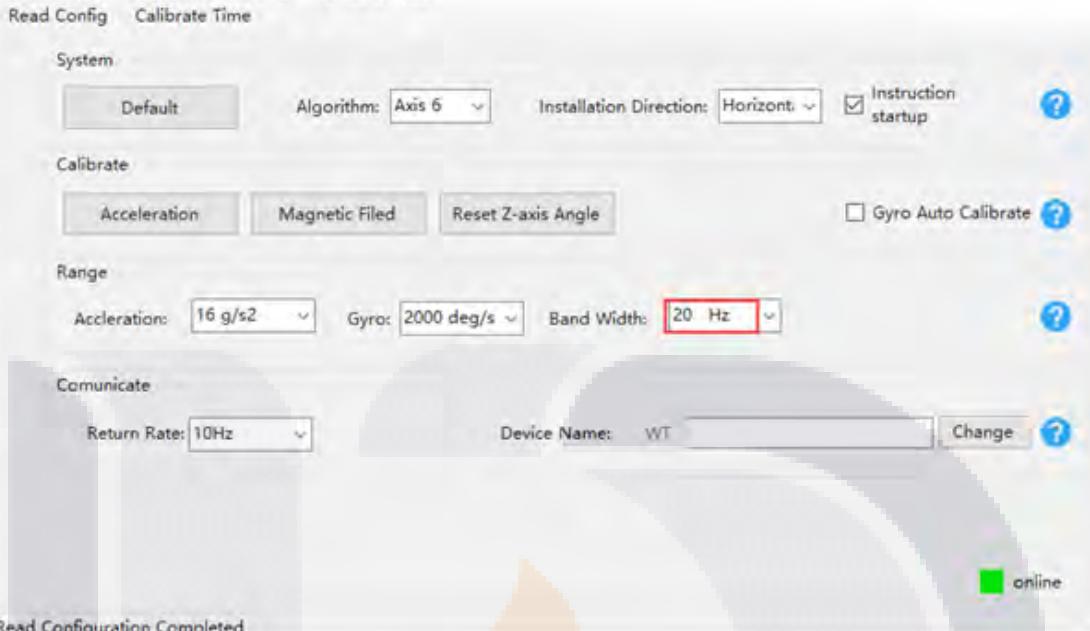
The z-axis angle is an absolute angle, and it takes the northeast sky as the coordinate system can not be relative to 0 degree.

Z axis to 0 is to make the initial angle of the z axis angle is relative 0 degree. When the module is used before and z - axis drift is large, the z - axis can be calibrated. When the module is powered on, the Z axis will automatically return to 0.

Calibration methods as follow: firstly keep the module static, click the "Reset Z-axis Angle" in the "Config", you will see the angle of the Z axis backs to 0 degree in the "Data".



Default bandwidth is 20Hz.



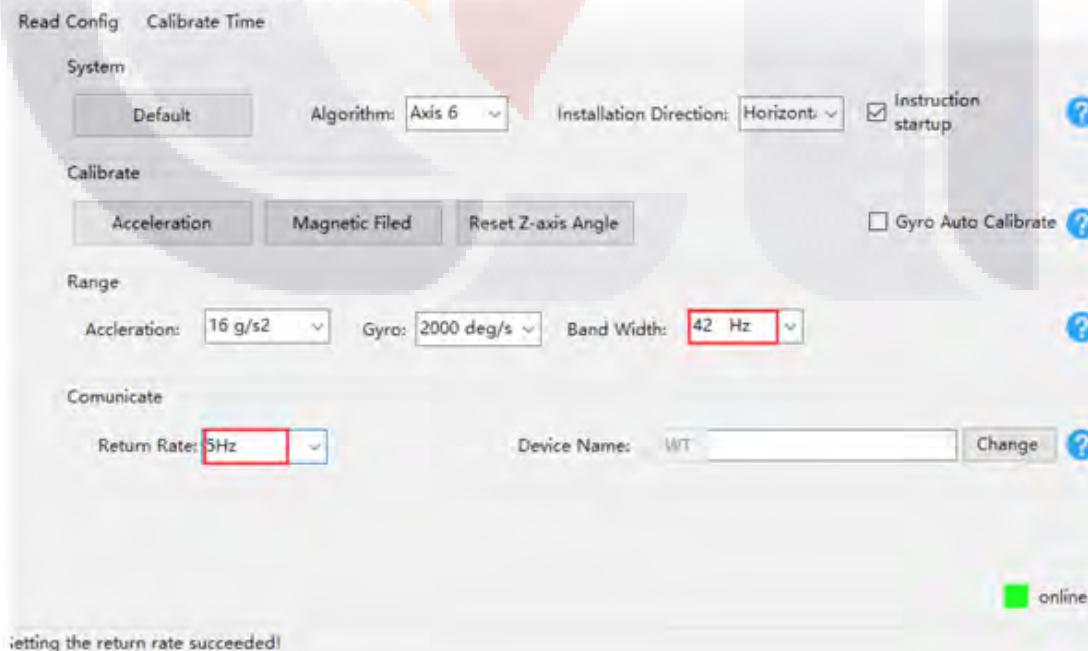
Read Configuration Completed

Explanation:

The higher rate of bandwidth setting will lead to higher fluctuation in data waveform. Conversely, the lower rate of bandwidth, data will become more fluent.

For example:

Bandwidth as 42Hz, Output rate as 5Hz.

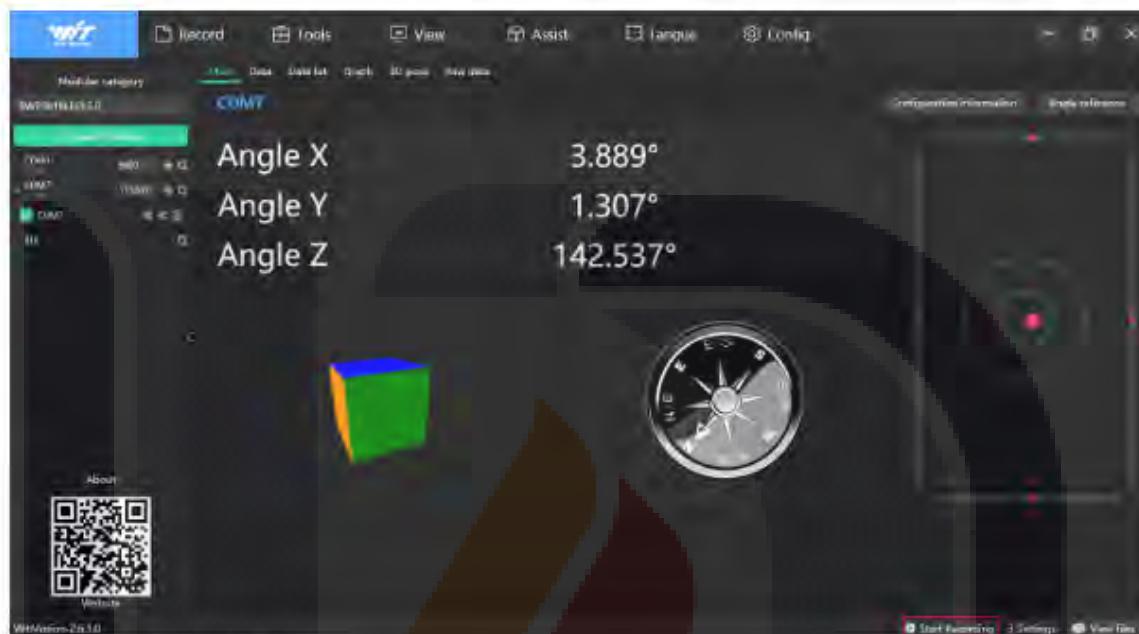


Setting the return rate succeeded!

ANEXO D. Manual para registro de aceleraciones del WT901BLECL5.0

6.2.5 Data Recording

Step 1. Click "Record"



. Step 2. Click "Stop".

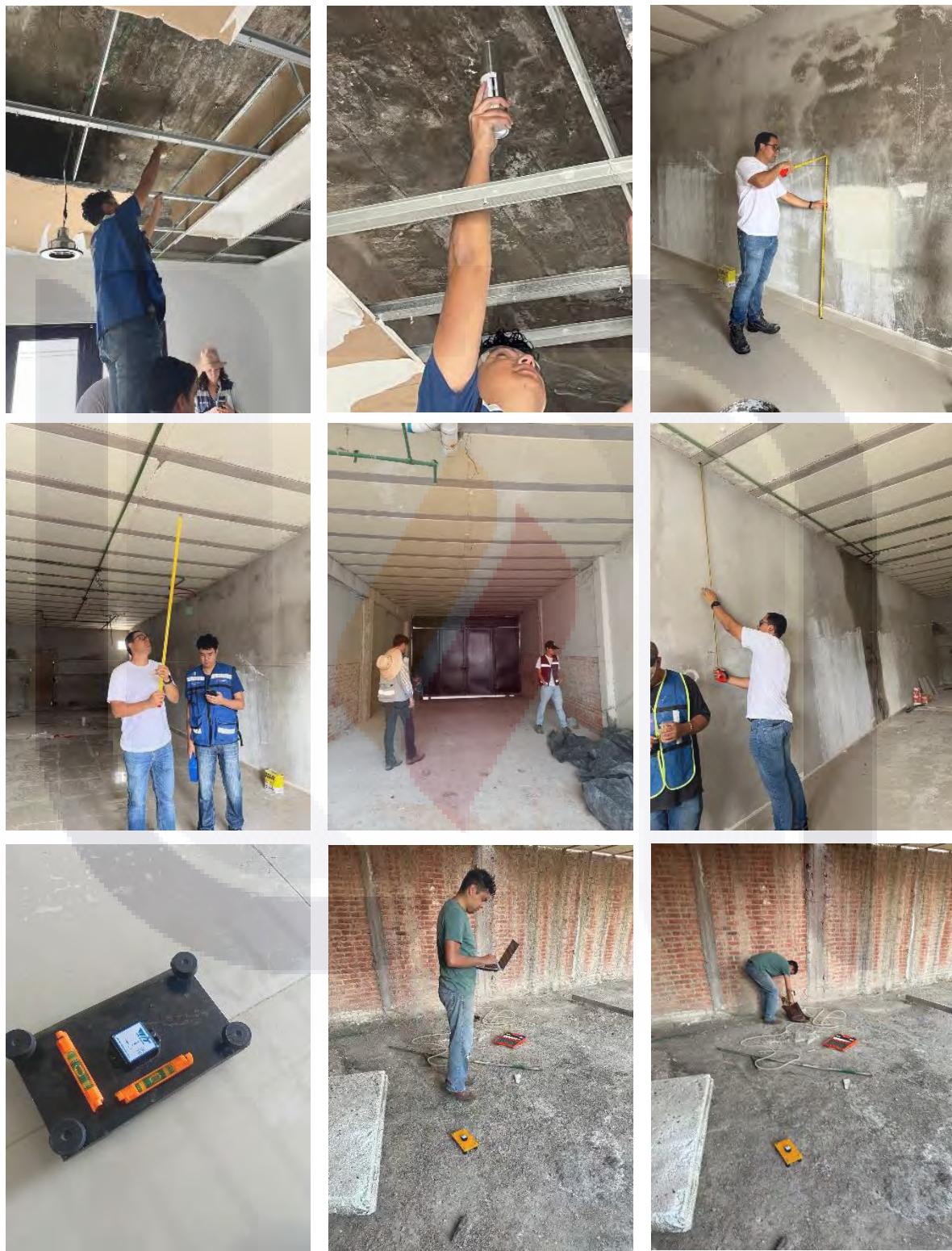


Step 3. Click "Yes" to view the 5 recorded data formats.

 Matlab	2024/3/4 星期一 17:58	文件夹	
 BWT901BLECL5.0_data_.bin	2024/3/4 星期一 17:58	BIN 文件	14 KB
 COM7_wplay	2024/3/4 星期一 17:58	WPLAV 文件	46 KB
 data_1	2024/3/4 星期一 17:58	Microsoft Excel ...	29 KB
 data_1	2024/3/4 星期一 17:58	文本文档	25 KB

Step 4. Take opening an Excel file as an example to view the data visually.

Time	Device	name	Chip	Time	Accelerati	Accelerati	Angular ve	Angular ve	Angular ve	X(°)	Y(°)	Angle Z(°)	Magnetic f	Magnetic f	Magnetic f	Temperat	Quaternio	Quaternio	Quaternio	Quaternions
18:00:16.9	COM7	2015-1-1	-0.164	-0.016	0.949	25.208	-100.647	-34.546	-0.357	17.106	-168.717	-1.666	-21.462	-26.264	30.31	-0.09915	-0.15189	-0.1901	0.98318	
18:00:17.0	COM7	2015-1-1	0.191	0.006	0.896	32.41	-115.173	-54.871	1.818	6.861	-173.623	-17.346	-23.324	-26.754	30.31	-0.07043	-0.05515	0.01193	0.99588	
18:00:17.1	COM7	2015-1-1	0.693	-0.036	1.054	117.676	-203.064	-7.446	6.361	-12.821	-173.188	-17.346	-23.324	-26.754	30.31	-0.06552	0.1329	0.07397	0.98615	
18:00:17.2	COM7	2015-1-1	0.757	0.323	0.691	39.49	-198.792	-22.766	16.798	-34.926	-177.27	-37.534	-27.832	-17.052	30.31	-0.06296	0.3262	0.15714	0.92996	
18:00:17.3	COM7	2015-1-1	0.579	0.276	0.645	8.972	-22.095	-18.066	23.807	-44.874	-177.907	-45.766	-30.086	-8.82	30.31	-0.06711	0.37009	0.18448	0.90796	
18:00:17.4	COM7	2015-1-1	0.145	0.096	0.911	-115.295	381.531	-30.09	14.568	-32.124	-174.194	-36.554	-28.224	-17.836	30.31	-0.09445	0.13409	0.08411	0.98282	
18:00:17.5	COM7	2015-1-1	0.048	0.112	0.969	-34.363	187.866	98.816	4.85	-5.746	-163.054	-18.13	-23.814	-26.754	30.31	-0.18018	-0.02167	0.19668	0.98315	
18:00:17.6	COM7	2015-1-1	-0.269	0.057	0.964	-18.138	69.702	82.998	2.032	4.521	-157.011	-8.918	-21.659	-27.244	30.31	-0.2067	-0.0791	0.00049	0.97516	
18:00:17.7	COM7	2015-1-1	-0.181	0.109	0.914	25.208	42.48	17.334	2.769	11.36	-154.775	-41.16	-21.952	-24.598	30.31	-0.22766	-0.08798	0.0246	0.96939	
18:00:17.8	COM7	2015-1-1	0.178	0.109	1.026	71.167	-112	57.373	6.691	6.768	-152.078	-13.426	-24.304	-23.03	30.31	-0.27094	0.2621	0.11374	0.95544	
18:00:17.9	COM7	2015-1-1	0.401	0.227	0.953	57.739	-206.848	51.514	12.634	-9.399	-145.596	-29.988	-26.264	-18.326	30.31	-0.28952	0.16251	0.09001	0.91977	
18:00:18.0	COM7	2015-1-1	0.814	0.24	0.818	99.426	-206.848	9.2102	19.078	-25.917	-149.008	-46.844	-26.558	-27.724	30.31	-0.28952	0.16251	0.09001	0.91977	
18:00:18.1	COM7	2015-1-1	0.907	0.42	0.428	217.102	-257.263	130.554	38.359	-49.098	-145.294	-54.194	-25.382	15.876	30.31	-0.38934	0.29242	0.41199	0.77008	
18:00:18.2	COM7	2015-1-1	0.954	0.495	-0.089	55.237	-28.015	49.011	61.403	-62.765	-158.357	-54.194	-25.382	15.876	30.31	-0.40536	0.35974	0.5145	0.6644	
18:00:18.3	COM7	2015-1-1	0.419	0.425	0.423	126.465	429.956	60.303	33.409	-50.938	-132.742	-52.214	-24.304	9.624	30.31	-0.47348	0.21133	0.034271	0.78333	
18:00:18.4	COM7	2015-1-1	0.201	0.434	0.843	-77.515	246.155	-59.631	16.941	-19.204	-124.387	-37.534	-23.912	-13.426	30.31	-0.47668	0.03357	0.15952	0.86377	
18:00:18.5	COM7	2015-1-1	-0.157	0.216	0.82	-24.358	85.876	-45.776	13.024	-3.461	-142.228	-24.108	-23.618	-20.874	30.31	-0.45618	-0.04208	0.10202	0.88297	
18:00:18.6	COM7	2015-1-1	0.084	0.24	0.909	-4.944	8.545	-41.138	12.409	1.566	-127.403	-18.914	-24.402	-21.168	30.31	-0.43118	-0.02682	0.11115	0.89493	
18:00:18.7	COM7	2015-1-1	0.688	0.151	0.972	184.021	-220.215	89.294	17.26	-12.997	-128.672	-33.614	-26.754	-13.72	30.31	-0.46866	0.12756	0.29092	0.82422	
18:00:18.8	COM7	2015-1-1	0.814	0.232	0.629	94.116	-130.066	127.319	25.873	-35.211	-125.299	-49	-26.068	0.784	30.31	-0.53256	0.21725	0.043277	0.69409	
18:00:18.9	COM7	2015-1-1	0.974	0.265	0.441	95.008	-137.207	85.205	37.408	-53.817	-121.74	-55.272	-24.402	17.052	30.31	-0.52994	0.27469	0.053378	0.59991	
18:00:19.0	COM7	2015-1-1	0.945	0.503	0.192	92.651	-39.704	50.049	52.57	-64.38	-130.128	-56.546	-22.932	22.54	30.31	-0.56931	0.25244	0.05047	0.59778	
18:00:19.1	COM7	2015-1-1	0.753	0.422	0.162	-129.211	17.04	-45.837	39.738	-60.436	-117.048	-51.548	-22.932	3.038	30.31	-0.56931	0.25244	0.05047	0.59778	
18:00:19.2	COM7	2015-1-1	0.412	0.224	0.87	-129.028	293.518	-155.945	18.754	-32.569	-110.374	-34.79	-21.364	-17.836	30.31	-0.57544	0.13016	0.27609	0.75867	
18:00:19.3	COM7	2015-1-1	0.073	0.099	0.922	-91.675	244.995	-177.063	7.537	-9.185	-120.718	-34.79	-21.364	-17.836	30.31	-0.47543	0.01227	0.07239	0.87662	
18:00:19.4	COM7	2015-1-1	-0.522	-0.005	0.847	-30.64	167.053	-253.174	1.351	13.524	-142.24	-9.996	-20.286	-24.794	30.31	-0.26365	0.014041	-0.04916	0.95502	
18:00:19.5	COM7	2015-1-1	-0.661	-0.318	0.86	-7.935	87.769	-247.742	-9.47	21.835	-174.326	10.584	-15.484	-19.894	30.31	-0.00272	-0.19568	0.01052	0.97504	
18:00:19.6	COM7	2015-1-1	-0.644	-0.396	0.808	-12.451	-11.292	-77.332	-15.573	20.814	160.937	16.954	-9.996	-17.346	30.31	-0.07678	-0.17694	0.12234	0.97351	
18:00:19.7	COM7	2015-1-1	-0.255	-0.615	0.779	24.353	-115.967	71.777	-13.964	15.057	-172.414	11.27	-10.78	-21.56	30.31	-0.01334	-0.06668	-0.09467	0.93313	
18:00:19.8	COM7	2015-1-1	0.471	-0.357	0.988	181.946	-212.463	217.102	-4.076	-0.181	-168.409	-11.956	-20.188	-24.108	30.31	-0.25342	0.10541	0.10287	0.95602	
18:00:20.0	COM7	2015-1-1	0.799	0.128	0.746	191.345	-290.161	248.84	11.964	-25.664	-143.566	-44.492	-24.696	-9.702	30.31	-0.41733	0.29932	0.27878	0.81143	
18:00:20.1	COM7	2015-1-1	1.027	0.011	0.61	249.878	-255.31	180.664	19.841	-52.954	-129.078	-59.388	-20.266	12.348	30.31	-0.54962	0.37762	0.04208	0.59979	
18:00:20.2	COM7	2015-1-1	1.154	0.163	0.137	83.679	-28.931	104.126	16.996	-70.697	-104.848	-60.662	-17.64	16.17	30.31	-0.55832	0.36588	0.36224	0.65042	
18:00:20.3	COM7	2015-1-1	0.695	0.286	0.174	-246.46	236.023	-96.13	6.993	-60.535	-104.008	-47.138	-19.894	-7.252	30.31	-0.55832	0.36588	0.36224	0.65042	
18:00:20.4	COM7	2015-1-1	0.144	0.366	0.812	-125.183	252.686	-156.311	5.059	-25.285	-122.701	-24.99	-19.502	-22.54	30.31	-0.46844	0.16656	0.13486	0.85703	
18:00:20.5	COM7	2015-1-1	-0.291	-0.072	0.967	-23.804	367.432	-169.8	0.445	-0.055	-142.921	-24.99	-19.502	-22.54	30.31	-0.29523	-0.03909	-0.01212	0.9545	

ANEXO E. Registro fotográfico de mediciones*Figura A. 2 Registro fotográfico de mediciones realizadas a inmueble.*

ANEXO F. Lecturas de aceleración registradas

Figura A. 3 Documento de aceleraciones registrada por acelerómetro Wit Motion

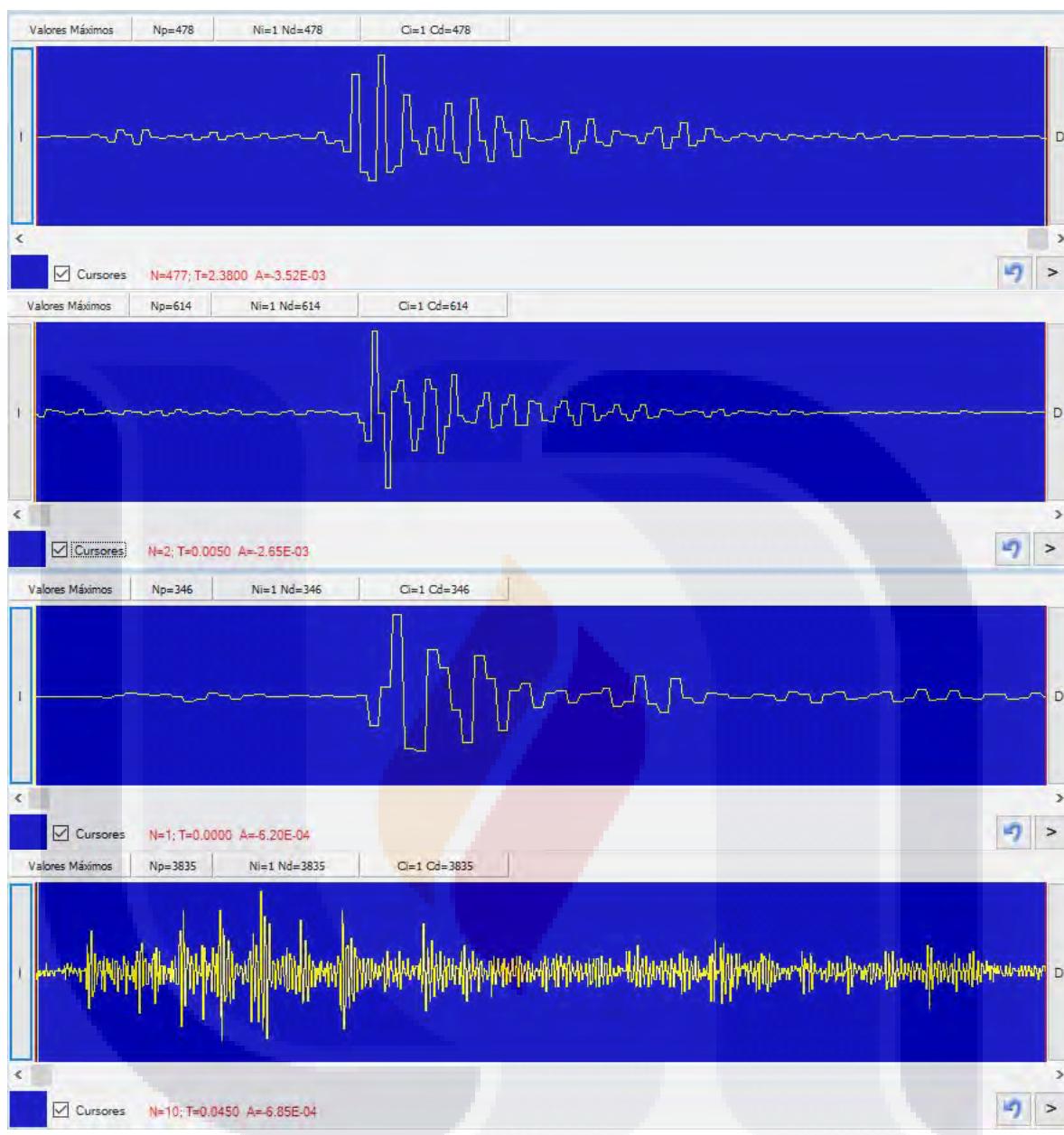


Figura A. 4 Datos brutos obtenidos con el acelerómetro durante la prueba de vibración

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

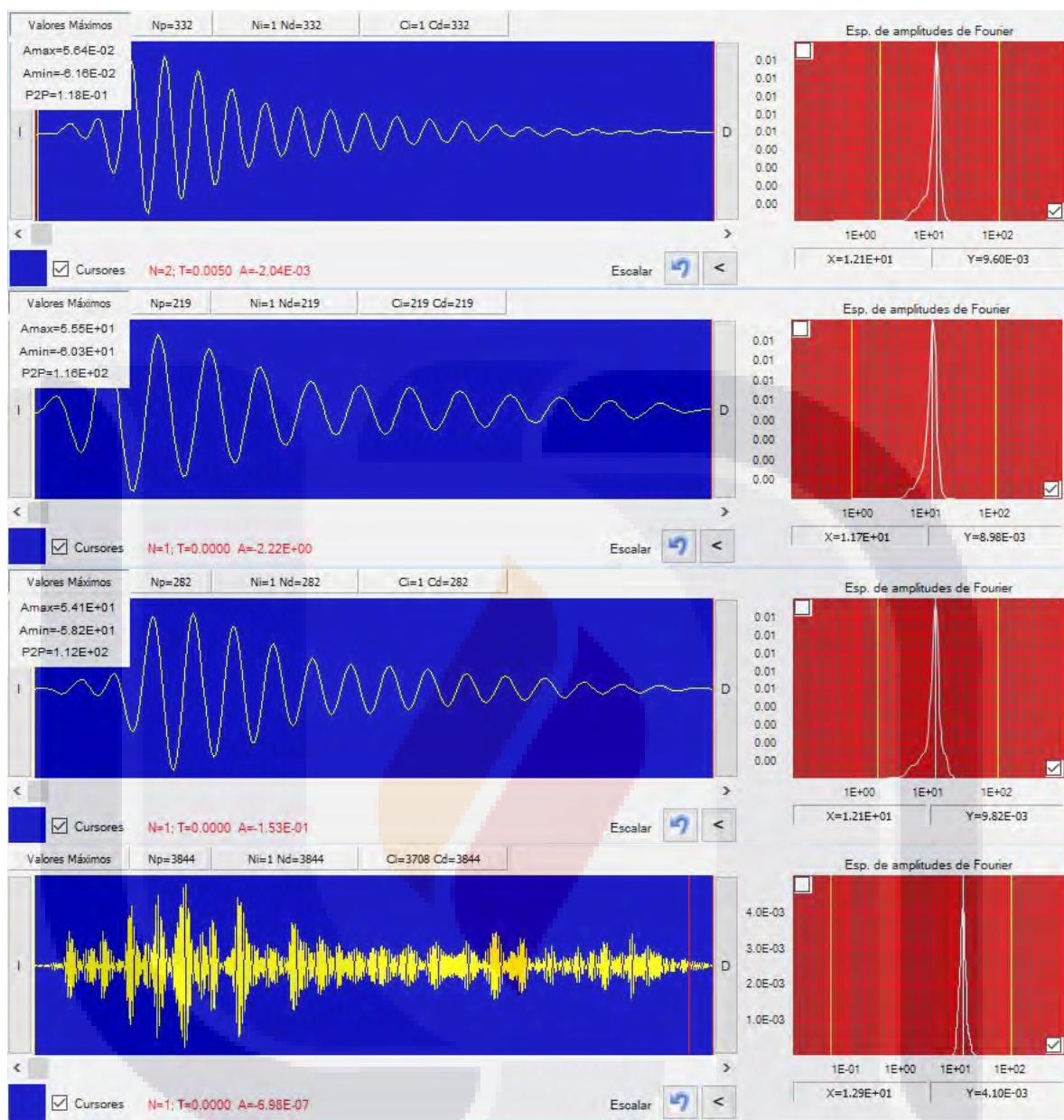


Figura A. 5 Señales filtradas y espectros de amplitud de Fourier correspondientes a cada acelerograma

ANEXO G. Parámetros de modelación

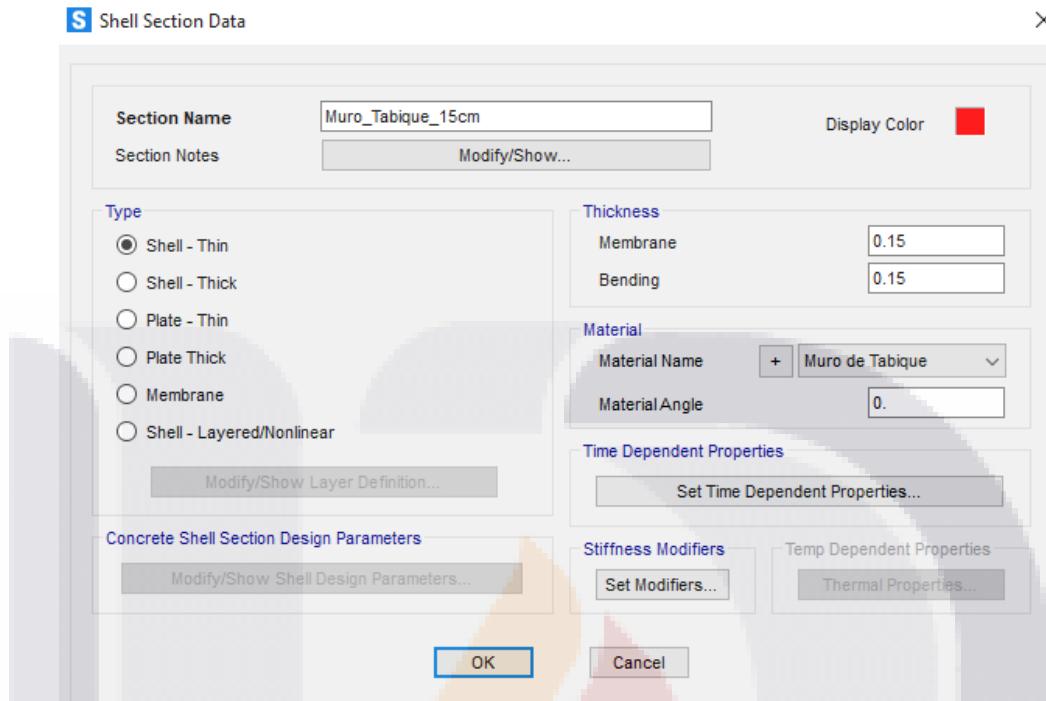


Figura A. 6Parámetros de modelación de muros de mampostería

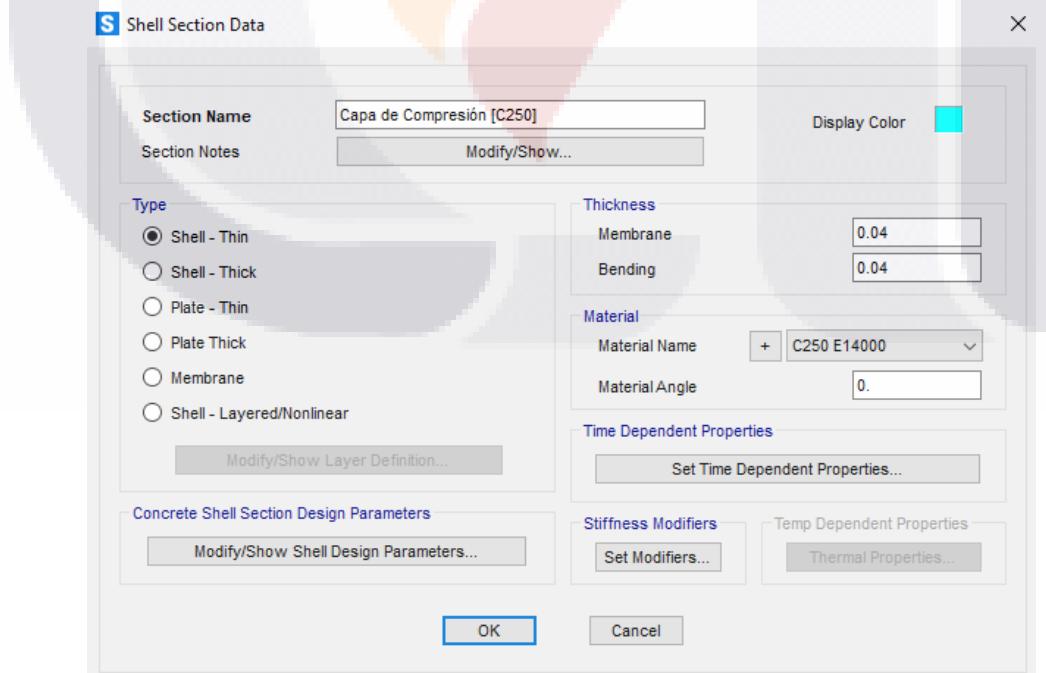


Figura A. 7 Parámetros de modelación de capa de compresión

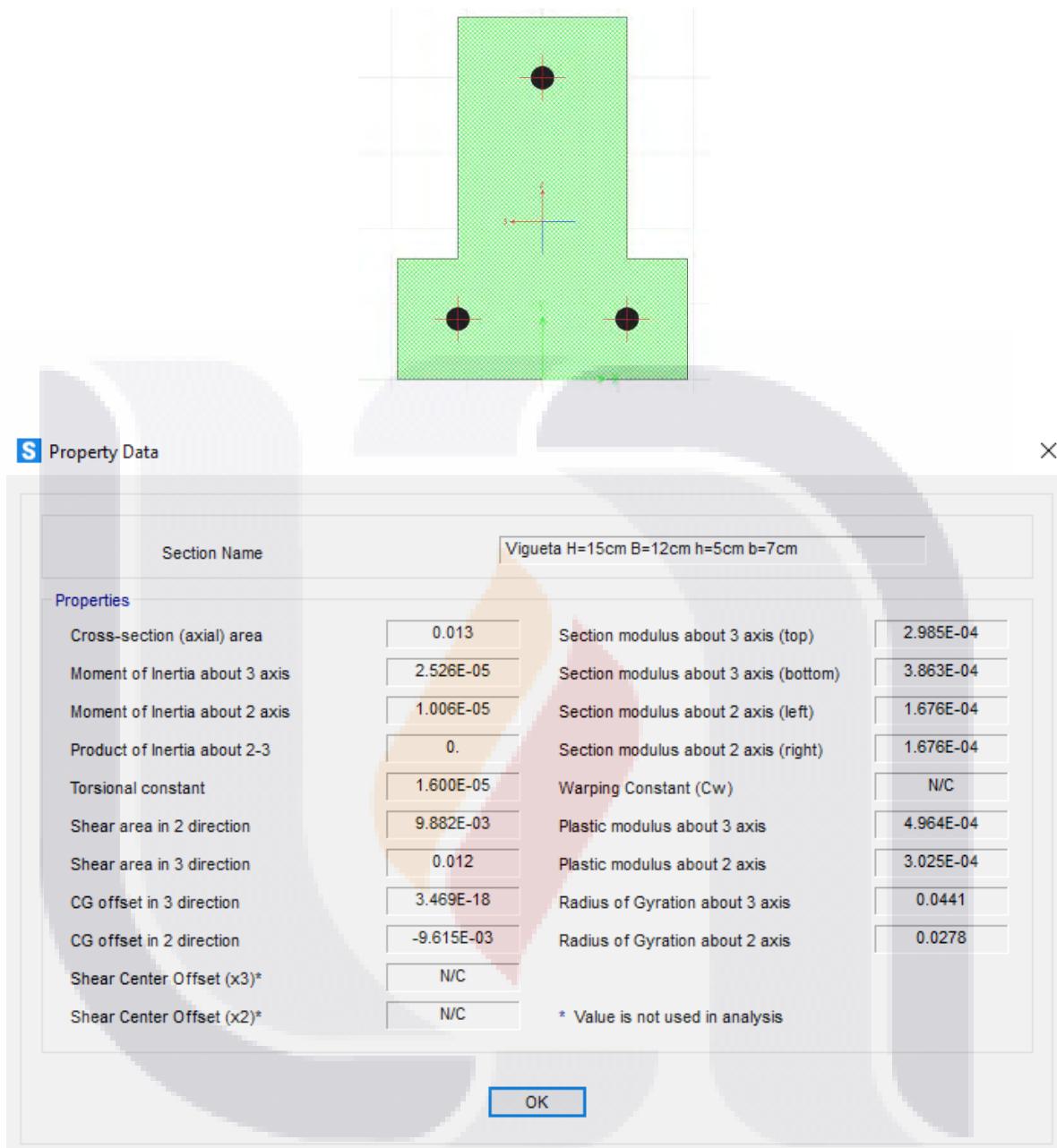


Figura A. 8 Parámetros de modelación de muros de mampostería de viguetas de concreto

S Link/Support Property Data

P-Delta Parameters

- Shear Couple
- Equal End Moments
- Advanced **Modify/Show...**

Total Mass and Weight

Mass	<input type="text" value="0."/>	Rotational Inertia 1	<input type="text" value="0."/>
Weight	<input type="text" value="0."/>	Rotational Inertia 2	<input type="text" value="0."/>
		Rotational Inertia 3	<input type="text" value="0."/>

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs

Directional Properties

Direction	Fixed	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for All...	<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>		

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor

Buttons

OK **Cancel**

Figura A. 9 Parámetros de modelación de muros de mampostería de vínculos rígidos

ANEXO H. Materiales de modelación

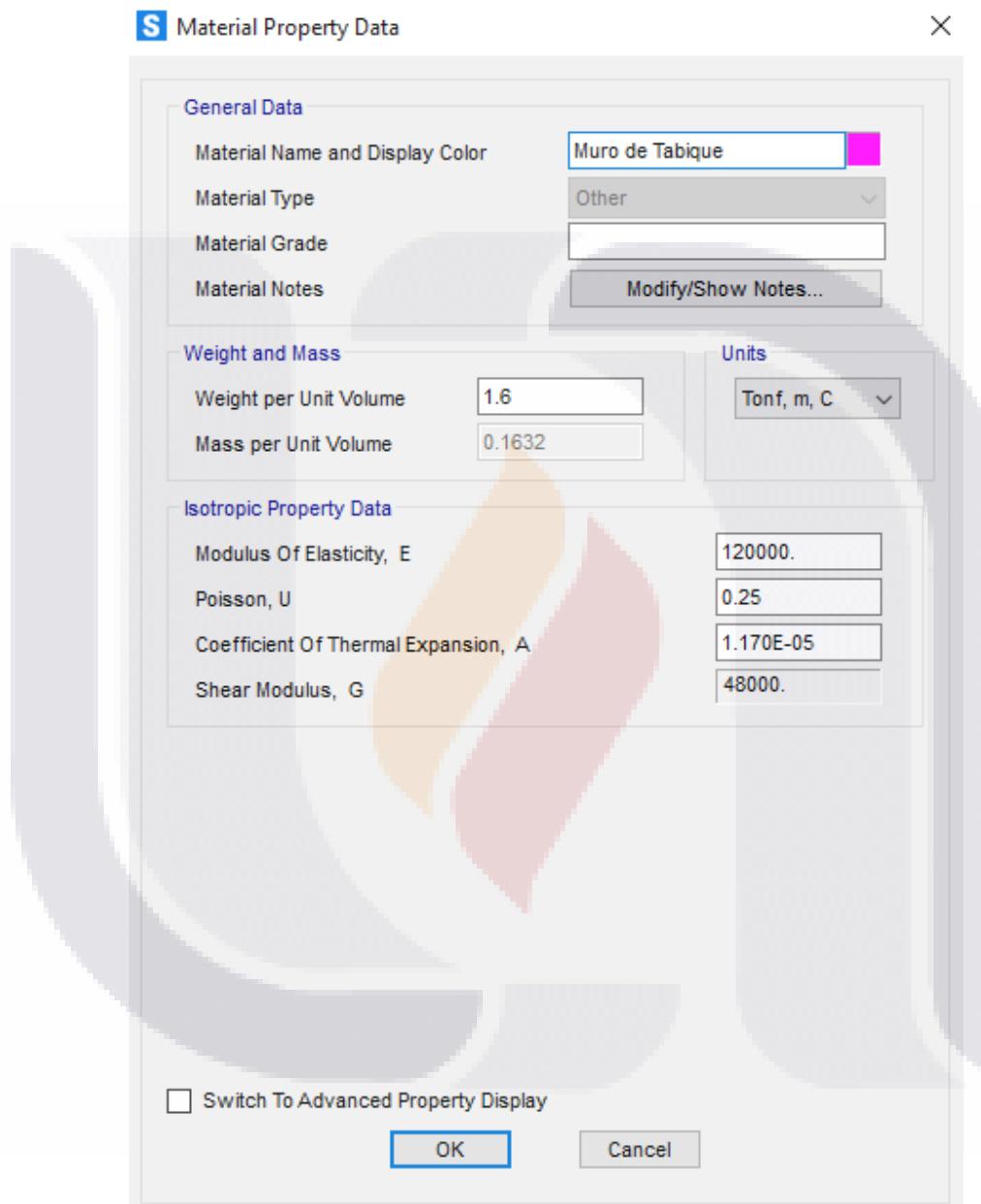


Figura A. 10 Parámetros de modelación del material tabique rojo recocido

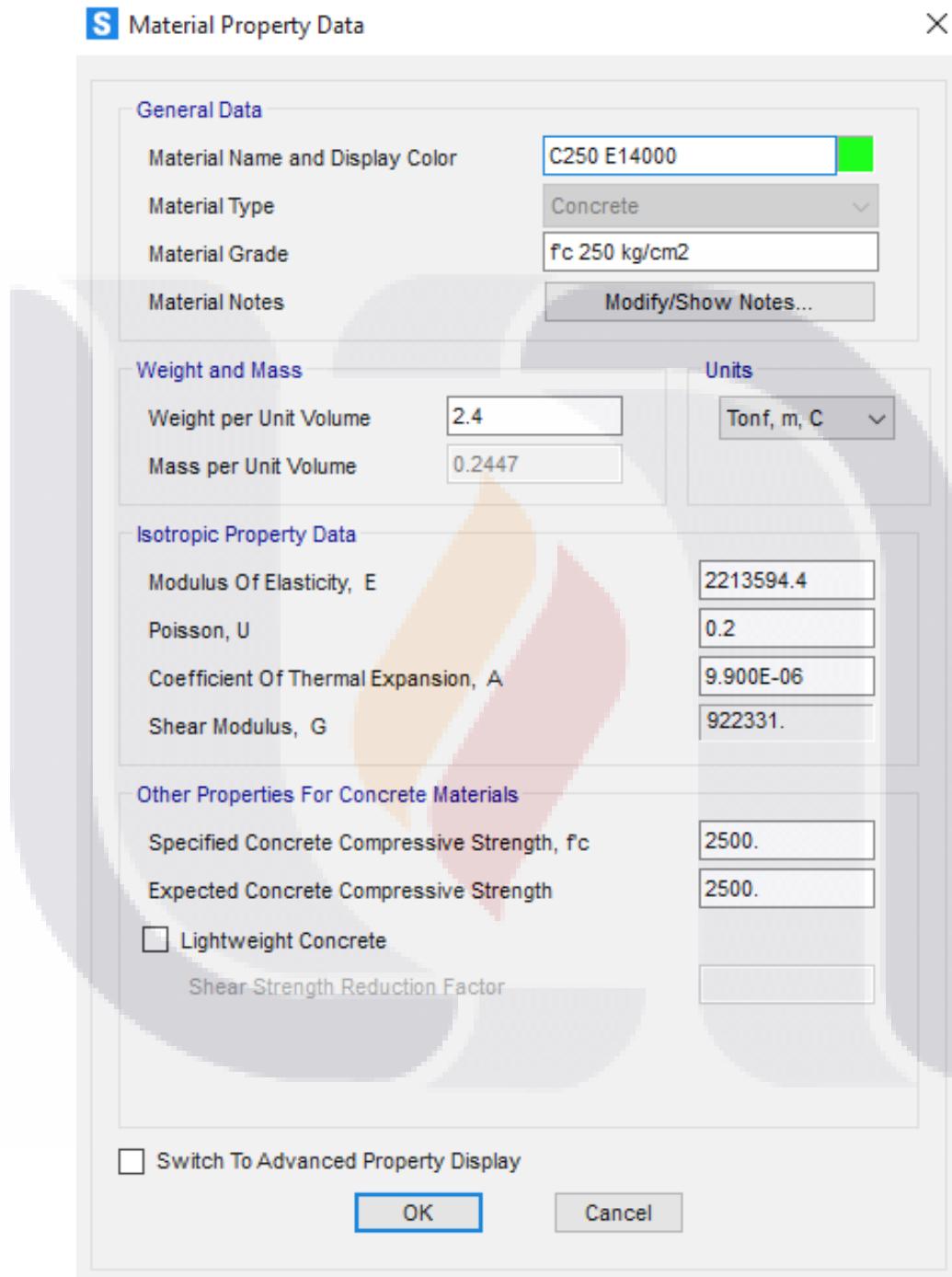


Figura A. 11 Parámetros de modelación del material Concreto clase A1 f'c = 250kg/cm²

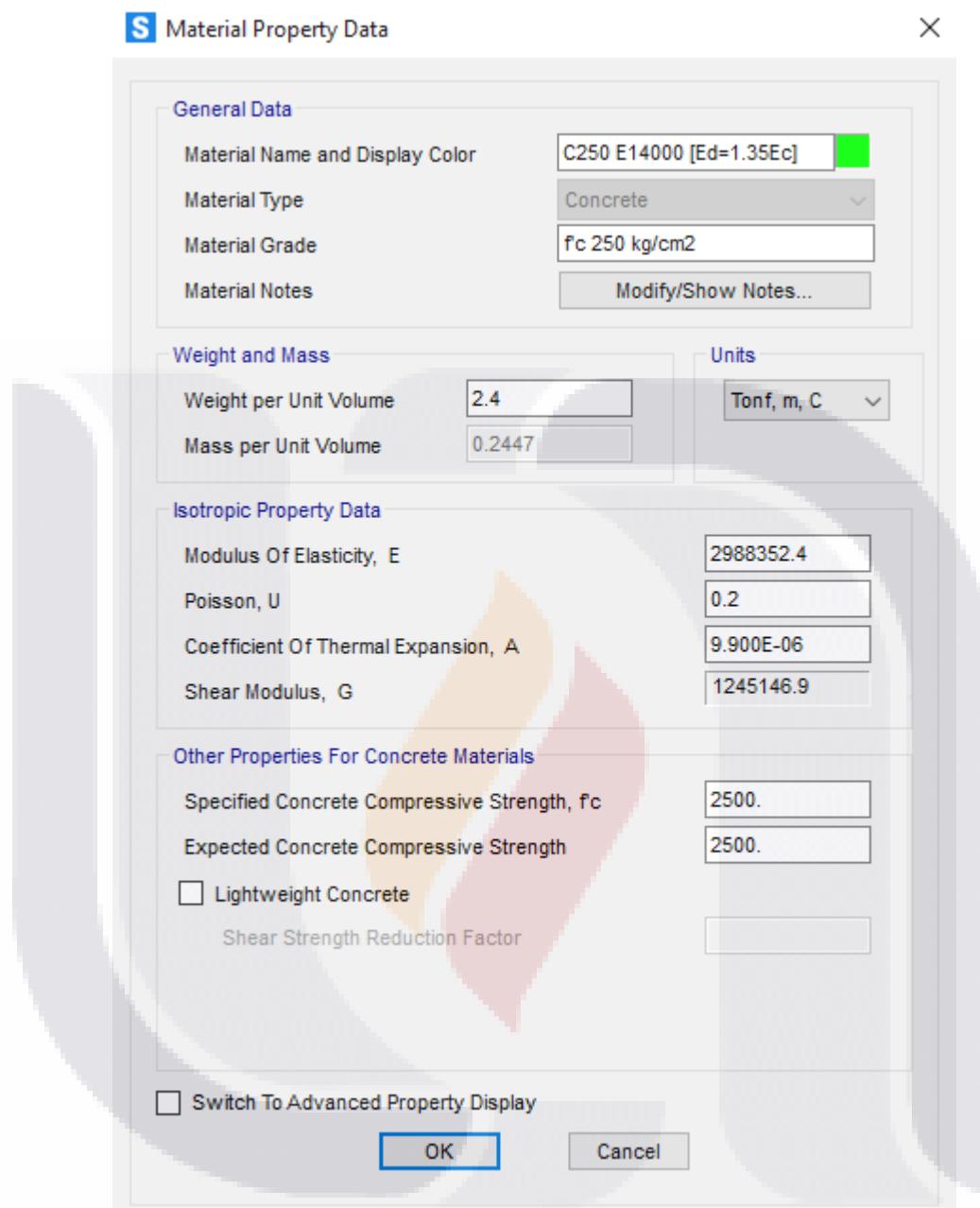


Figura A. 12 Parámetros de modelación del material concreto clase 1A ($f'_c=250\text{kg}/\text{cm}^2$) con módulo de elasticidad dinámico

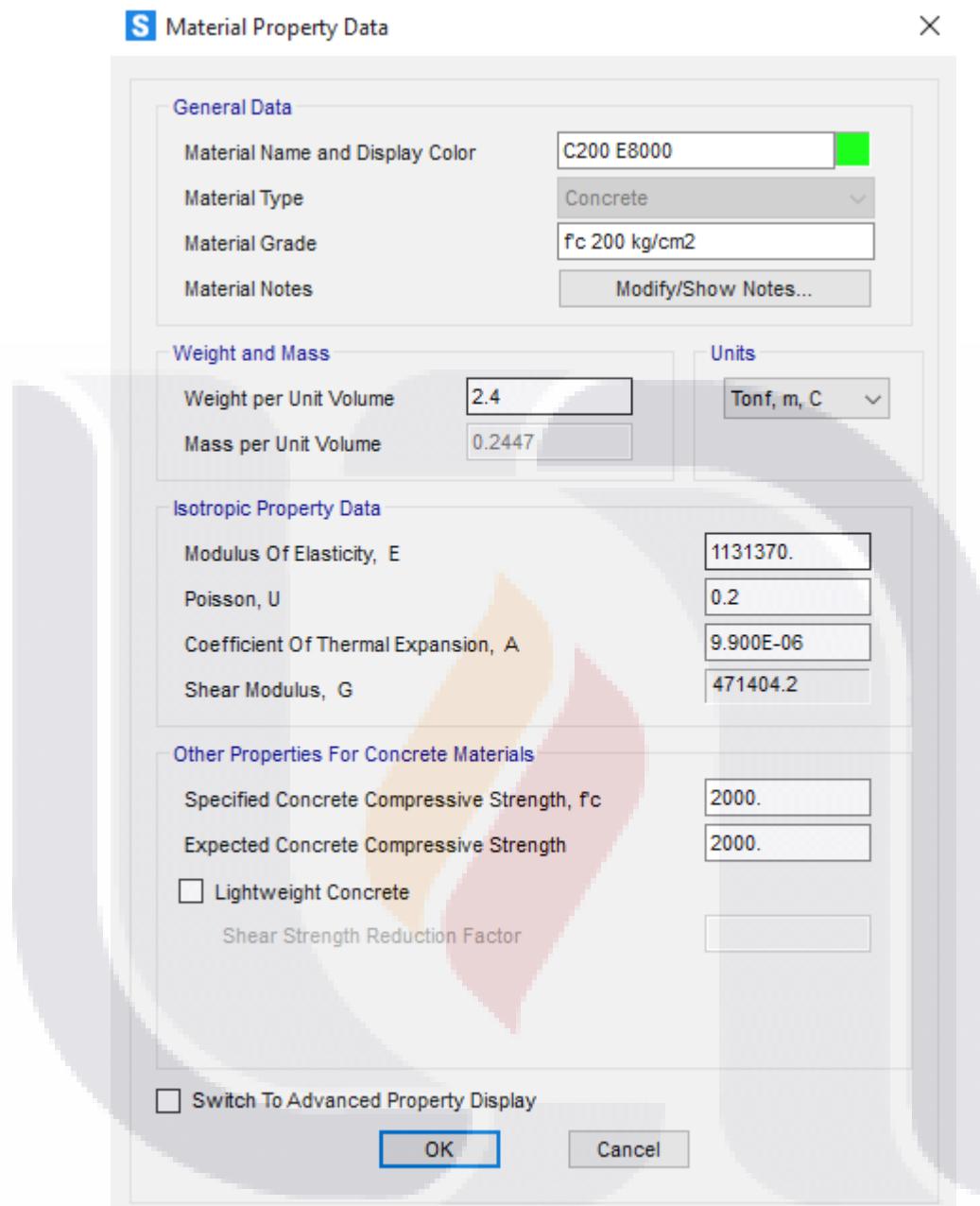


Figura A. 13 Parámetros de modelación del material concreto clase 2 ($f'_c = 200\text{kg/cm}^2$)

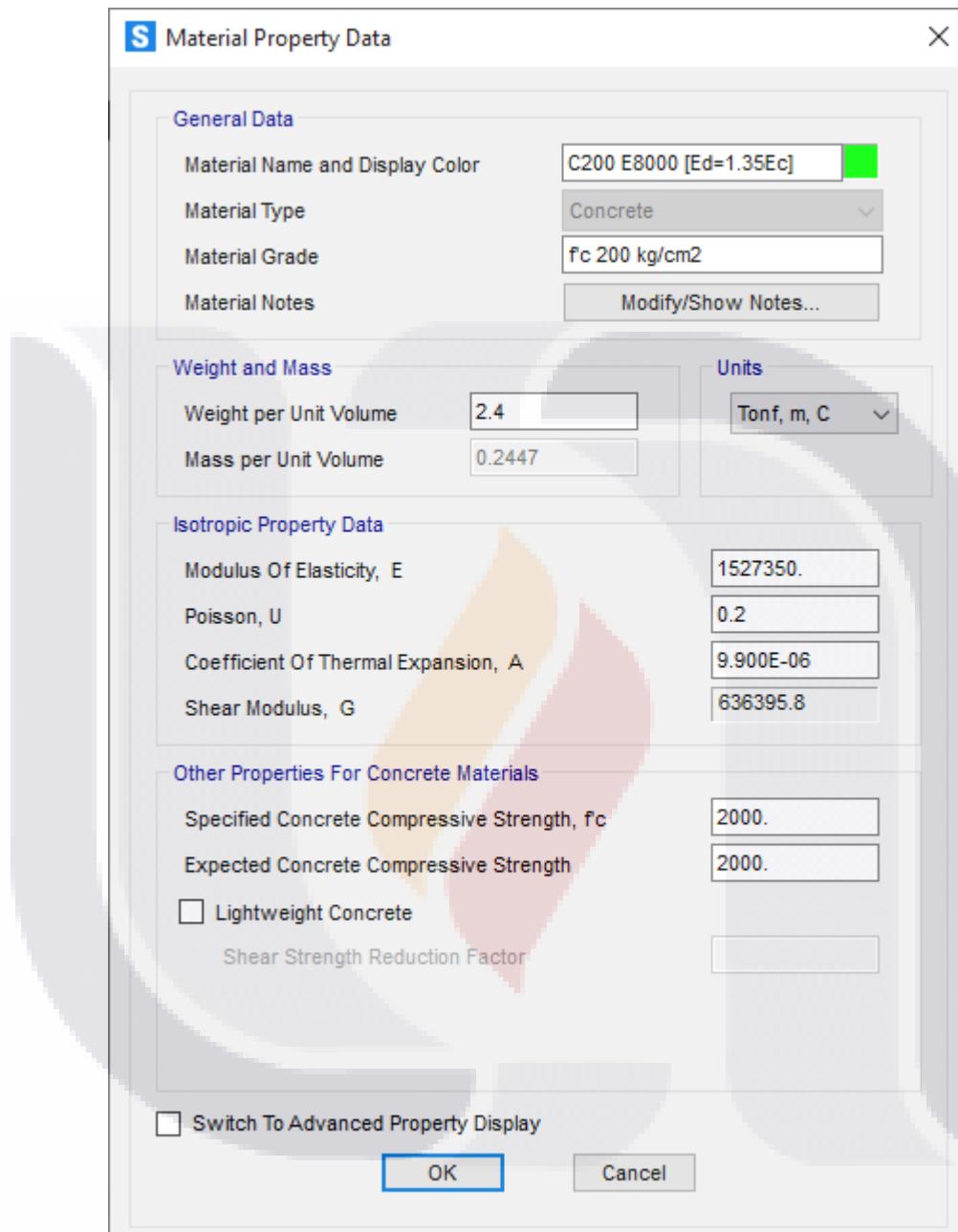


Figura A. 14 Parámetros de modelación del material concreto clase 2 ($f'_c=200\text{kg/cm}^2$) con módulo de elasticidad dinámico

ANEXO I. Especificaciones de casos de carga

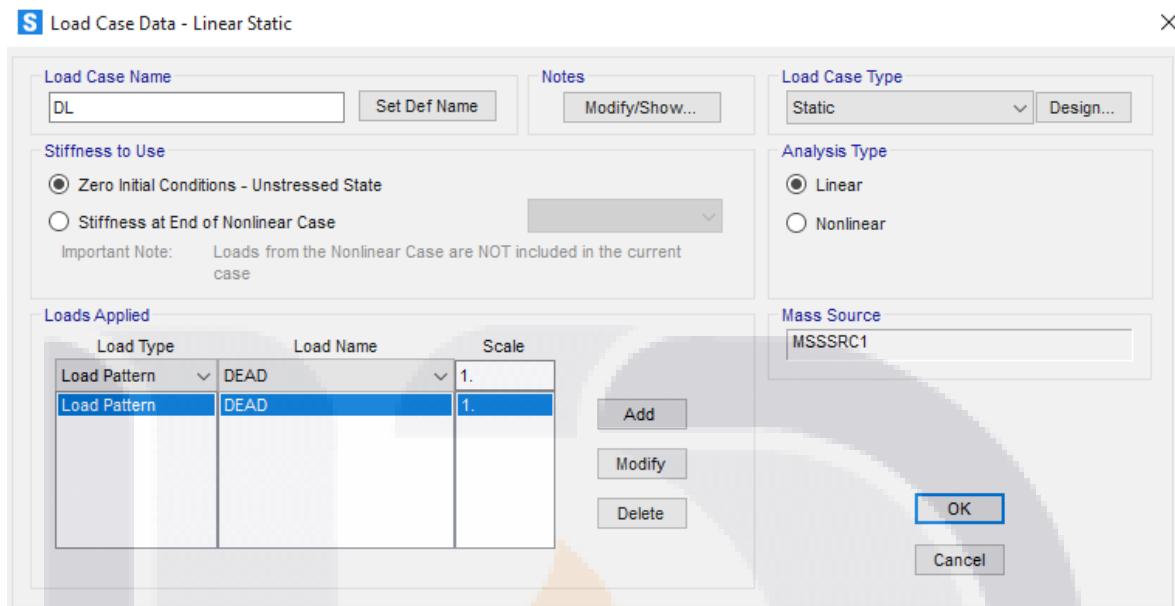


Figura A. 15 Caso de carga para el estado de carga muerta (DL)

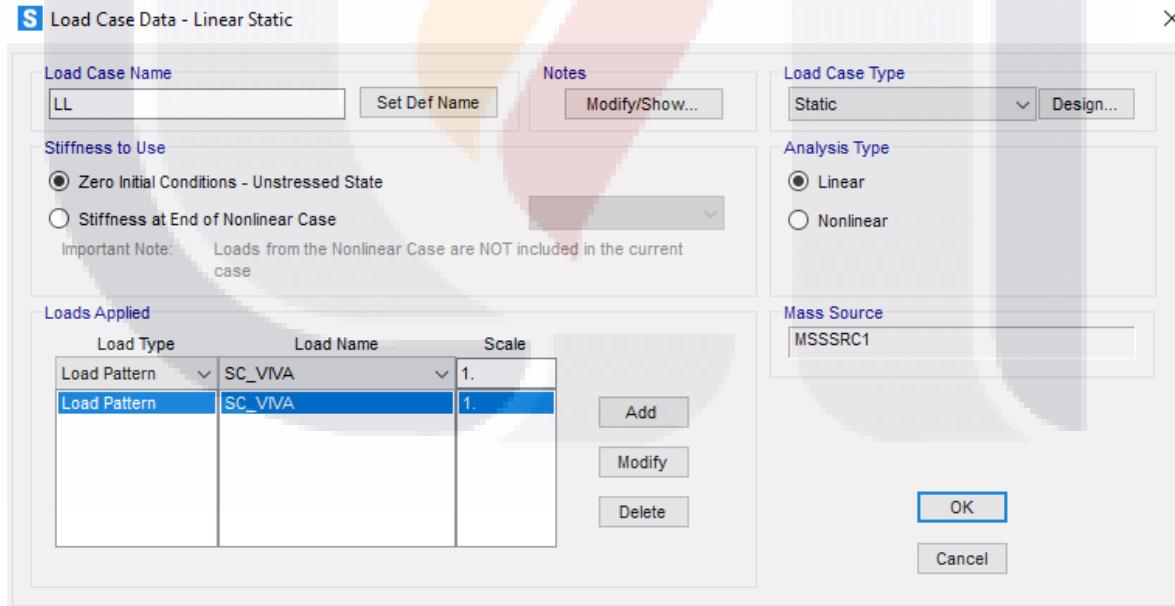


Figura A. 16 Caso de carga para el estado de carga viva (LL)

ANEXO J. Especificaciones de análisis modal

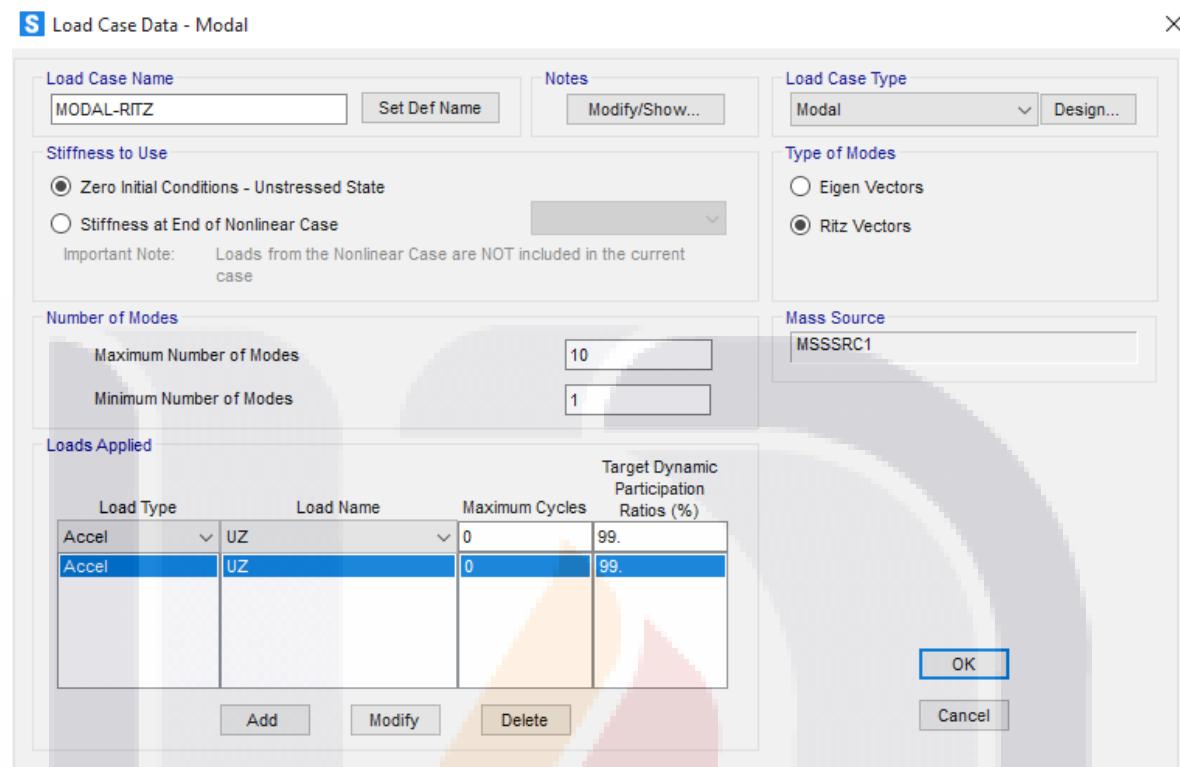


Figura A. 17 Parámetros de modelación del análisis modal

ANEXO K. Algunos ejemplos de modelos numéricos desarrollados

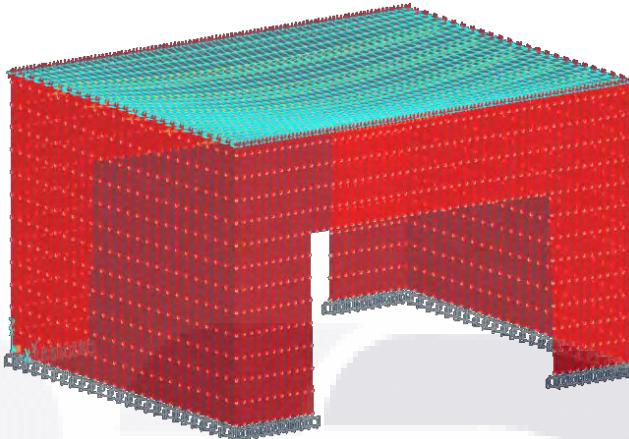


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL-RITZ	Mode	1	0.108294	1.302E-12	7.183E-12	0.201059	1.302E-12	7.183E-12	0.201059	6.487E-12	2.379E-12	1.239E-14	6.487E-13	2.379E-12	1.239E-14
MODAL-RITZ	Mode	2	0.099991	0.028952	0.743842	4.327E-12	0.028952	0.743842	4.327E-12	0.028952	0.743842	5.116E-11	0.025383	0.000441	5.117E-11
MODAL-RITZ	Mode	3	0.097533	4.291E-12	1.852E-11	0.020369	0.028952	0.743842	0.221428	6.846E-13	1.999E-13	1.759E-15	0.025383	0.000441	5.117E-11
MODAL-RITZ	Mode	4	0.059381	1.812E-11	7.529E-13	0.011632	0.028952	0.743842	0.233059	8.665E-16	6.806E-10	5.193E-15	0.025383	0.000441	5.118E-11
MODAL-RITZ	Mode	5	0.040586	4.91E-08	6.935E-09	0.061588	0.028952	0.743842	0.294648	5.021E-10	0.000001403	9.659E-11	0.025383	0.000443	1.478E-10
MODAL-RITZ	Mode	6	0.036501	0.000026	0.000004068	0.00097	0.028978	0.743846	0.295618	2.223E-07	0.000718	2.994E-08	0.025383	0.001161	3.009E-08
MODAL-RITZ	Mode	7	0.027052	0.000003421	6.417E-07	0.13376	0.028981	0.743847	0.429378	2.907E-08	0.000092	1.931E-09	0.025383	0.001253	3.202E-08
MODAL-RITZ	Mode	8	0.020408	0.000037	0.000007544	0.14611	0.029019	0.743854	0.575488	3.399E-07	0.000991	1.75E-08	0.025383	0.002244	4.952E-08
MODAL-RITZ	Mode	9	0.015506	0.000041	0.000008526	0.269331	0.02906	0.743863	0.844819	3.814E-07	0.00107	1.772E-08	0.025384	0.003314	6.724E-08
MODAL-RITZ	Mode	10	0.008099	0.000086	0.000019	0.104951	0.029146	0.743881	0.94977	8.245E-07	0.002234	3.499E-08	0.025385	0.005548	1.022E-07

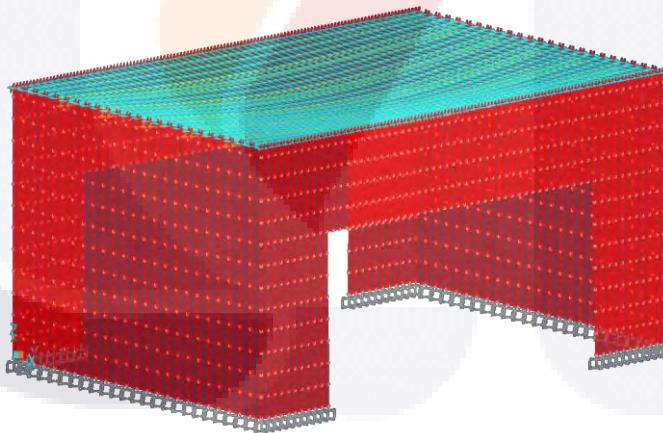


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL-RITZ	Mode	1	0.133551	3.849E-13	6.945E-13	0.232523	3.849E-13	6.945E-13	0.232523	2.386E-13	1.482E-12	6.971E-15	2.386E-13	1.482E-12	6.971E-15
MODAL-RITZ	Mode	2	0.117917	5.163E-11	1.787E-12	0.008544	5.202E-11	2.482E-12	0.241067	5.107E-14	4.594E-13	7.875E-16	2.897E-13	1.941E-12	7.759E-15
MODAL-RITZ	Mode	3	0.115455	0.131553	0.226685	6.331E-13	0.131553	0.226685	0.241067	0.005718	0.001003	2.228E-13	0.005718	0.001003	2.305E-13
MODAL-RITZ	Mode	4	0.071744	0.031548	0.499643	2.009E-10	0.163101	0.726328	0.241067	0.012608	0.004125	9.871E-11	0.018326	0.005128	9.894E-11
MODAL-RITZ	Mode	5	0.060547	6.099E-08	8.114E-07	0.005041	0.163101	0.726329	0.246108	2.053E-08	4.847E-10	2.589E-13	0.018326	0.005128	9.92E-11
MODAL-RITZ	Mode	6	0.044095	0.000000495	0.0000005837	0.091207	0.163101	0.726335	0.337315	1.455E-07	4.192E-10	9.312E-13	0.018326	0.005128	1.001E-10
MODAL-RITZ	Mode	7	0.031351	0.000061	0.000683	0.104139	0.163162	0.727018	0.441454	0.000017	1.072E-08	2.923E-11	0.018343	0.005128	1.294E-10
MODAL-RITZ	Mode	8	0.02334	0.001723	0.018983	0.083994	0.164885	0.746001	0.525448	0.000477	1.197E-07	3.476E-10	0.01882	0.005128	4.769E-10
MODAL-RITZ	Mode	9	0.017222	0.002231	0.024338	0.251147	0.167116	0.770338	0.776595	0.000612	7.704E-08	2.946E-10	0.019432	0.005128	7.715E-10
MODAL-RITZ	Mode	10	0.010982	0.002816	0.030499	0.162579	0.169932	0.800838	0.939174	0.000767	5.134E-08	2.906E-10	0.020199	0.005129	1.062E-09

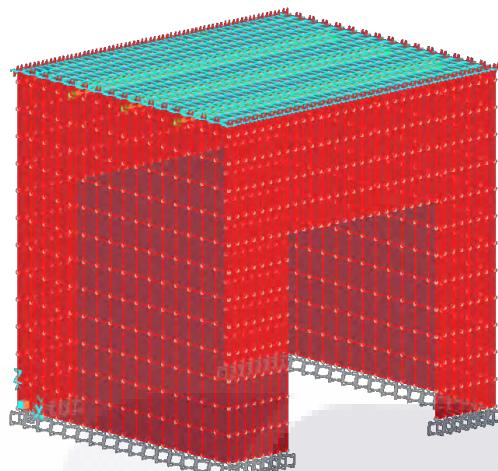


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL-RITZ	Mode	1	0.096838	2.43E-13	0.84934	2.871E-13	2.43E-13	0.84934	2.871E-13	0.070063	1.423E-13	5.048E-15	0.070063	1.423E-13	5.048E-15
MODAL-RITZ	Mode	2	0.060909	1.296E-09	6.293E-13	0.008827	1.296E-09	0.84934	0.008827	4.703E-14	1.849E-10	2.565E-13	0.070063	1.851E-10	2.615E-13
MODAL-RITZ	Mode	3	0.060586	0.546787	0.000000134	2.271E-11	0.546787	0.84934	0.008827	0.0000001236	0.087161	0.000002605	0.070064	0.087161	0.000002605
MODAL-RITZ	Mode	4	0.04669	2.411E-12	1.295E-12	0.094239	0.546787	0.84934	0.103069	9.228E-14	2.071E-11	2.023E-11	0.070064	0.087161	0.000002605
MODAL-RITZ	Mode	5	0.040815	2.3E-12	6.548E-13	0.119311	0.546787	0.84934	0.222377	1.277E-12	1.999E-12	2.187E-11	0.070064	0.087161	0.000002605
MODAL-RITZ	Mode	6	0.022001	0.0000015	6.594E-10	0.091383	0.546802	0.84934	0.31376	5.249E-09	0.000006077	0.000000024	0.070064	0.087167	0.000002629
MODAL-RITZ	Mode	7	0.020608	0.0000021	1.139E-09	0.201481	0.546823	0.84934	0.515241	1.398E-08	0.000008297	3.597E-08	0.070064	0.087175	0.000002665
MODAL-RITZ	Mode	8	0.015502	0.0000025	1.421E-09	0.315652	0.546848	0.84934	0.830893	1.969E-08	0.000008192	3.647E-08	0.070064	0.087183	0.000002702
MODAL-RITZ	Mode	9	0.01092	0.0000405	2.158E-08	0.04089	0.547253	0.84934	0.871782	2.166E-07	0.000127	5.161E-07	0.070065	0.087311	0.000003218
MODAL-RITZ	Mode	10	0.005173	0.000278	1.376E-08	0.09824	0.547531	0.84934	0.970022	1.235E-07	0.000084	3.297E-07	0.070065	0.087395	0.000003548

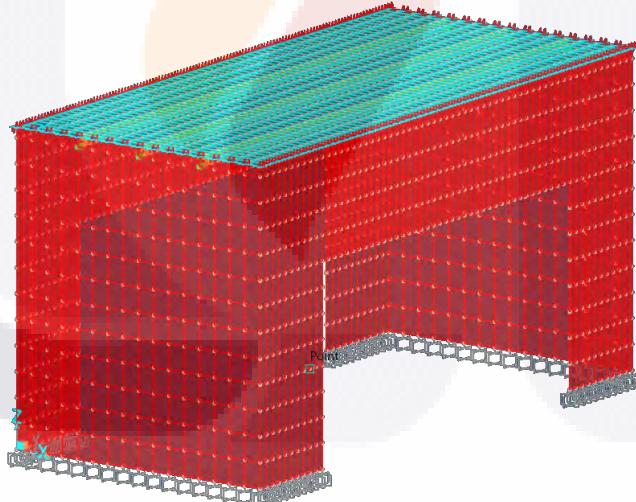


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL-RITZ	Mode	1	0.120768	0.25539	3.899E-07	6.502E-14	0.25539	3.899E-07	6.502E-14	2.294E-08	0.006573	6.671E-08	2.294E-08	0.006573	6.671E-08
MODAL-RITZ	Mode	2	0.119193	6.5E-12	1.5E-12	0.006142	0.25539	3.899E-07	0.006142	1.665E-13	4.654E-13	9.7E-15	2.294E-08	0.006573	6.671E-08
MODAL-RITZ	Mode	3	0.10497	1.176E-12	1.202E-10	0.223578	0.25539	0.00000039	0.22972	6.511E-12	2.614E-12	2.197E-14	2.294E-08	0.006573	6.671E-08
MODAL-RITZ	Mode	4	0.093325	3.529E-08	0.864461	3.392E-11	0.25539	0.864461	0.22972	0.023336	6.213E-08	1.832E-08	0.023336	0.006573	8.502E-08
MODAL-RITZ	Mode	5	0.050798	3.414E-08	7.155E-11	0.00095	0.255391	0.864461	0.23067	5.491E-11	1.268E-08	1.216E-09	0.023336	0.006573	8.624E-08
MODAL-RITZ	Mode	6	0.038392	0.000000596	4.017E-09	0.013554	0.255391	0.864461	0.244224	2.381E-09	1.476E-07	2.44E-08	0.023336	0.006573	1.106E-07
MODAL-RITZ	Mode	7	0.033355	1.721E-07	1.449E-09	0.221562	0.255391	0.864461	0.465785	4.831E-10	4.376E-08	6.991E-09	0.023336	0.006573	1.176E-07
MODAL-RITZ	Mode	8	0.020936	0.000000586	6.419E-08	0.12667	0.255397	0.864461	0.592455	2.307E-08	0.000001467	0.00000224	0.023336	0.006575	3.416E-07
MODAL-RITZ	Mode	9	0.015114	0.000012	1.428E-07	0.279346	0.255409	0.864461	0.871801	4.476E-08	0.00000306	4.656E-07	0.023336	0.006578	8.072E-07
MODAL-RITZ	Mode	10	0.007381	0.000081	0.000000998	0.083225	0.25549	0.864462	0.955026	2.576E-07	0.00002	0.000003115	0.023337	0.006598	0.000003923

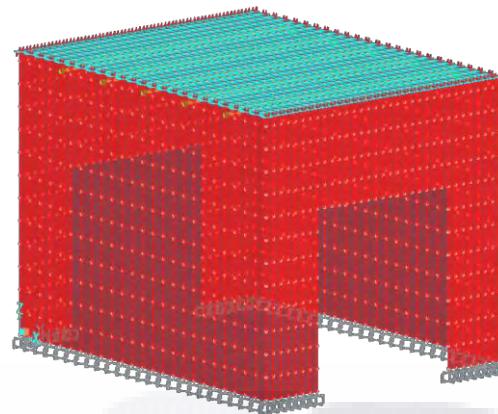


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ		
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless		
MODAL-RITZ	Mode	1	0.106461	8.106E-10	0.857928	1.357E-14	8.106E-10	0.857928	1.357E-14	0.061761	8.828E-10	0.000283	0.061761	8.828E-10	0.000283		
MODAL-RITZ	Mode	2	0.068377	0.017678	8.637E-14	0.014084	0.017678	8.57928	0.014084	1.305E-15	0.000497	2.025E-14	0.061761	0.000497	0.000283		
MODAL-RITZ	Mode	3	0.062448	0.26748	4.786E-14	0.004058	0.285158	8.57928	0.018142	1.407E-14	0.012848	1.441E-13	0.061761	0.013346	0.000283		
MODAL-RITZ	Mode	4	0.05408	0.034677	1.768E-13	0.015641	0.319834	8.57928	0.033783	1.661E-12	0.004749	1.277E-12	0.061761	0.018095	0.000283		
MODAL-RITZ	Mode	5	0.044792	0.000411	4.394E-14	0.1956	0.320245	8.57928	0.229383	1.51E-12	0.00008	3.018E-14	0.061761	0.018175	0.000283		
MODAL-RITZ	Mode	6	0.03515	0.036847	4.495E-10	0.000234	0.357092	8.57928	0.229617	7.686E-09	0.067502	9.217E-10	0.061166	4.051E-11	0.061761	0.085677	0.000283
MODAL-RITZ	Mode	7	0.029027	0.001016	1.424E-11	0.053715	0.358107	8.57928	0.283332	2.313E-10	0.001166	8.317E-11	0.061761	0.086961	0.000283		
MODAL-RITZ	Mode	8	0.019998	0.00373	5.74E-11	0.218066	0.361837	8.57928	0.501398	6.709E-10	0.000118	8.317E-11	0.061761	0.086961	0.000283		
MODAL-RITZ	Mode	9	0.015544	0.003425	8.635E-11	0.339243	0.365262	8.57928	0.840641	7.421E-10	0.000896	8.91E-11	0.061761	0.087857	0.000283		
MODAL-RITZ	Mode	10	0.007348	0.007508	2.942E-10	0.105363	0.372769	8.57928	0.946004	1.849E-09	0.009425	2.281E-10	0.061761	0.097282	0.000283		

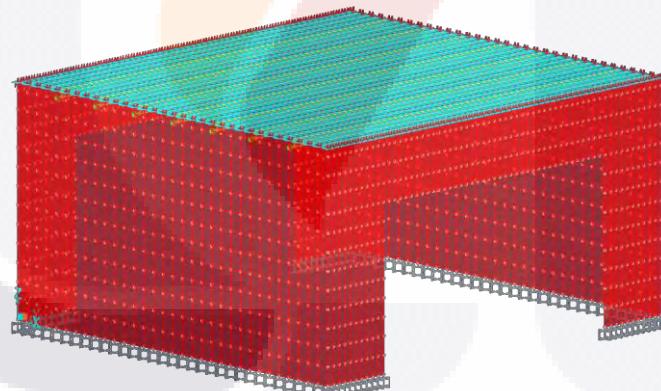


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL-RITZ	Mode	1	0.145585	2.144E-14	1.281E-12	0.258054	2.144E-14	1.281E-12	0.258054	1.586E-13	2.17E-12	5.565E-15	1.586E-13	2.17E-12	5.565E-15
MODAL-RITZ	Mode	2	0.128989	0.000001841	0.852961	3.609E-13	0.000001841	0.852961	0.258054	0.024199	0.000017	8.206E-14	0.024199	0.000017	8.762E-14
MODAL-RITZ	Mode	3	0.097311	9.168E-11	1.211E-12	0.0008	0.000001841	0.852961	0.258854	1.124E-14	1.346E-09	8.697E-15	0.024199	0.000017	9.632E-14
MODAL-RITZ	Mode	4	0.068472	0.002188	0.000017	0.00000127	0.00219	0.852978	0.258855	6.602E-07	0.021433	1.69E-08	0.0242	0.021449	1.69E-08
MODAL-RITZ	Mode	5	0.065672	1.292E-07	1.088E-09	0.05262	0.00219	0.852978	0.311474	4.773E-11	0.000001257	3.948E-14	0.0242	0.02145	1.69E-08
MODAL-RITZ	Mode	6	0.044838	0.002912	0.000034	0.000154	0.005102	0.853011	0.311629	0.00000089	0.027955	3.311E-08	0.024201	0.049405	5.001E-08
MODAL-RITZ	Mode	7	0.036878	0.000089	0.000001078	0.08412	0.005191	0.853013	0.39749	2.83E-08	0.000851	6.173E-10	0.024201	0.050256	5.062E-08
MODAL-RITZ	Mode	8	0.028245	0.001497	0.000019	0.029226	0.006687	0.853031	0.424975	5.037E-07	0.014321	7.015E-09	0.024202	0.064577	5.764E-08
MODAL-RITZ	Mode	9	0.019689	0.000535	0.000006969	0.251072	0.007222	0.853038	0.676047	1.856E-07	0.00511	2.017E-09	0.024202	0.069687	5.965E-08
MODAL-RITZ	Mode	10	0.012512	0.000456	0.000006036	0.256744	0.007678	0.853044	0.932791	1.614E-07	0.004356	1.558E-09	0.024202	0.074043	6.121E-08

ANEXO L. Tablas y matrices de análisis dinámico con variación de amortiguamiento

B [m]	L [m]	fn [Hz]	Po [Kg]	β	No. Viguetas	w [Kg/m ²]	W [Kg]	ao/g max	ap/g
2.8	3.2	21.13	29.56	0.04	3	219.4	1966	0.005	0.0002
2.8	3.6	18.57	29.56	0.04	3	219.4	2212	0.005	0.0005
2.8	4.0	16.18	29.56	0.04	3	219.4	2458	0.005	0.0010
2.8	4.4	14.27	29.56	0.04	3	219.4	2703	0.005	0.0018
2.8	4.8	12.86	29.56	0.04	3	219.4	2949	0.005	0.0028
2.8	5.2	11.33	29.56	0.04	3	219.4	3195	0.005	0.0044
2.8	5.6	10.43	29.56	0.04	3	219.4	3441	0.005	0.0056
2.8	6.0	9.68	29.56	0.04	3	219.4	3686	0.005	0.0068
3.5	3.2	15.32	29.56	0.04	4	221.7	2483	0.005	0.0014
3.5	3.6	14.31	29.56	0.04	4	221.7	2793	0.005	0.0018
3.5	4.0	13.39	29.56	0.04	4	221.7	3103	0.005	0.0022
3.5	4.4	12.42	29.56	0.04	4	221.7	3414	0.005	0.0028
3.5	4.8	11.19	29.56	0.04	4	221.7	3724	0.005	0.0039
3.5	5.2	10.04	29.56	0.04	4	221.7	4034	0.005	0.0055
3.5	5.6	9.08	29.56	0.04	4	221.7	4344	0.005	0.0071
3.5	6.0	8.28	29.56	0.04	4	221.7	4655	0.005	0.0087
4.2	3.2	14.64	29.56	0.04	5	223.1	2999	0.005	0.0015
4.2	3.6	13.90	29.56	0.04	5	223.1	3374	0.005	0.0017
4.2	4.0	12.94	29.56	0.04	5	223.1	3749	0.005	0.0021
4.2	4.4	11.69	29.56	0.04	5	223.1	4124	0.005	0.0030
4.2	4.8	10.37	29.56	0.04	5	223.1	4499	0.005	0.0044
4.2	5.2	9.21	29.56	0.04	5	223.1	4873	0.005	0.0060
4.2	5.6	8.24	29.56	0.04	5	223.1	5248	0.005	0.0079
4.2	6.0	7.44	29.56	0.04	5	223.1	5623	0.005	0.0097
4.9	3.2	14.39	29.56	0.04	6	224.2	3516	0.005	0.0014
4.9	3.6	13.70	29.56	0.04	6	224.2	3955	0.005	0.0015
4.9	4.0	12.71	29.56	0.04	6	224.2	4394	0.005	0.0020
4.9	4.4	11.41	29.56	0.04	6	224.2	4834	0.005	0.0028
4.9	4.8	10.09	29.56	0.04	6	224.2	5273	0.005	0.0041
4.9	5.2	8.93	29.56	0.04	6	224.2	5713	0.005	0.0057
4.9	5.6	7.97	29.56	0.04	6	224.2	6152	0.005	0.0074
4.9	6.0	7.16	29.56	0.04	6	224.2	6592	0.005	0.0092
5.6	3.2	14.04	29.56	0.04	7	225.0	4032	0.005	0.0013
5.6	3.6	13.42	29.56	0.04	7	225.0	4536	0.005	0.0015
5.6	4.0	12.43	29.56	0.04	7	225.0	5040	0.005	0.0019
5.6	4.4	11.13	29.56	0.04	7	225.0	5544	0.005	0.0027
5.6	4.8	9.82	29.56	0.04	7	225.0	6048	0.005	0.0039
5.6	5.2	8.67	29.56	0.04	7	225.0	6552	0.005	0.0054
5.6	5.6	7.71	29.56	0.04	7	225.0	7056	0.005	0.0071
5.6	6.0	6.90	29.56	0.04	7	225.0	7560	0.005	0.0087
6.0	3.2	13.89	29.56	0.04	8	227.6	4370	0.005	0.0013
6.0	3.6	13.29	29.56	0.04	8	227.6	4916	0.005	0.0014
6.0	4.0	12.32	29.56	0.04	8	227.6	5462	0.005	0.0018
6.0	4.4	11.03	29.56	0.04	8	227.6	6009	0.005	0.0026
6.0	4.8	9.73	29.56	0.04	8	227.6	6555	0.005	0.0037
6.0	5.2	8.59	29.56	0.04	8	227.6	7101	0.005	0.0052
6.0	5.6	7.63	29.56	0.04	8	227.6	7647	0.005	0.0067
6.0	6.0	6.82	29.56	0.04	8	227.6	8194	0.005	0.0083

Tabla A. 2 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 1A ($f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=4\%$

B [m]	L [m]	fn [Hz]	Po [Kg]	β	No. Viguetas	w [Kg/m ²]	W [Kg]	ao/g max	ap/g
2.8	3.2	21.13	29.56	0.05	3	219.4	1966	0.005	0.0002
2.8	3.6	18.57	29.56	0.05	3	219.4	2212	0.005	0.0004
2.8	4.0	16.18	29.56	0.05	3	219.4	2458	0.005	0.0008
2.8	4.4	14.27	29.56	0.05	3	219.4	2703	0.005	0.0015
2.8	4.8	12.86	29.56	0.05	3	219.4	2949	0.005	0.0022
2.8	5.2	11.33	29.56	0.05	3	219.4	3195	0.005	0.0035
2.8	5.6	10.43	29.56	0.05	3	219.4	3441	0.005	0.0045
2.8	6.0	9.68	29.56	0.05	3	219.4	3686	0.005	0.0054
3.5	3.2	15.32	29.56	0.05	4	221.7	2483	0.005	0.0011
3.5	3.6	14.31	29.56	0.05	4	221.7	2793	0.005	0.0014
3.5	4.0	13.39	29.56	0.05	4	221.7	3103	0.005	0.0018
3.5	4.4	12.42	29.56	0.05	4	221.7	3414	0.005	0.0022
3.5	4.8	11.19	29.56	0.05	4	221.7	3724	0.005	0.0032
3.5	5.2	10.04	29.56	0.05	4	221.7	4034	0.005	0.0044
3.5	5.6	9.08	29.56	0.05	4	221.7	4344	0.005	0.0057
3.5	6.0	8.28	29.56	0.05	4	221.7	4655	0.005	0.0070
4.2	3.2	14.64	29.56	0.05	5	223.1	2999	0.005	0.0012
4.2	3.6	13.90	29.56	0.05	5	223.1	3374	0.005	0.0014
4.2	4.0	12.94	29.56	0.05	5	223.1	3749	0.005	0.0017
4.2	4.4	11.69	29.56	0.05	5	223.1	4124	0.005	0.0024
4.2	4.8	10.37	29.56	0.05	5	223.1	4499	0.005	0.0035
4.2	5.2	9.21	29.56	0.05	5	223.1	4873	0.005	0.0048
4.2	5.6	8.24	29.56	0.05	5	223.1	5248	0.005	0.0063
4.2	6.0	7.44	29.56	0.05	5	223.1	5623	0.005	0.0078
4.9	3.2	14.39	29.56	0.05	6	224.2	3516	0.005	0.0011
4.9	3.6	13.70	29.56	0.05	6	224.2	3955	0.005	0.0012
4.9	4.0	12.71	29.56	0.05	6	224.2	4394	0.005	0.0016
4.9	4.4	11.41	29.56	0.05	6	224.2	4834	0.005	0.0023
4.9	4.8	10.09	29.56	0.05	6	224.2	5273	0.005	0.0033
4.9	5.2	8.93	29.56	0.05	6	224.2	5713	0.005	0.0045
4.9	5.6	7.97	29.56	0.05	6	224.2	6152	0.005	0.0059
4.9	6.0	7.16	29.56	0.05	6	224.2	6592	0.005	0.0073
5.6	3.2	14.04	29.56	0.05	7	225.0	4032	0.005	0.0011
5.6	3.6	13.42	29.56	0.05	7	225.0	4536	0.005	0.0012
5.6	4.0	12.43	29.56	0.05	7	225.0	5040	0.005	0.0015
5.6	4.4	11.13	29.56	0.05	7	225.0	5544	0.005	0.0022
5.6	4.8	9.82	29.56	0.05	7	225.0	6048	0.005	0.0031
5.6	5.2	8.67	29.56	0.05	7	225.0	6552	0.005	0.0043
5.6	5.6	7.71	29.56	0.05	7	225.0	7056	0.005	0.0056
5.6	6.0	6.90	29.56	0.05	7	225.0	7560	0.005	0.0070
6.0	3.2	13.89	29.56	0.05	8	227.6	4370	0.005	0.0010
6.0	3.6	13.29	29.56	0.05	8	227.6	4916	0.005	0.0011
6.0	4.0	12.32	29.56	0.05	8	227.6	5462	0.005	0.0015
6.0	4.4	11.03	29.56	0.05	8	227.6	6009	0.005	0.0021
6.0	4.8	9.73	29.56	0.05	8	227.6	6555	0.005	0.0030
6.0	5.2	8.59	29.56	0.05	8	227.6	7101	0.005	0.0041
6.0	5.6	7.63	29.56	0.05	8	227.6	7647	0.005	0.0054
6.0	6.0	6.82	29.56	0.05	8	227.6	8194	0.005	0.0066

Tabla A. 3 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 1A ($f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=5\%$

		Largo (L) [m]							
		3.20	3.60	4.00	4.40	4.80	5.20	5.60	6.00
Ancho (B) [m]	2.80	0.0002	0.0005	0.0010	0.0018	0.0028	0.0044	0.0056	0.0068
	3.50	0.0014	0.0018	0.0022	0.0028	0.0039	0.0055	0.0071	0.0087
	4.20	0.0015	0.0017	0.0021	0.0030	0.0044	0.0060	0.0079	0.0097
	4.90	0.0014	0.0015	0.0020	0.0028	0.0041	0.0057	0.0074	0.0092
	5.60	0.0013	0.0015	0.0019	0.0027	0.0039	0.0054	0.0071	0.0087

Tabla A. 4 Matriz de límites de confort de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 1A ($f'c=250\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=4\%$

		Largo (L) [m]							
		3.20	3.60	4.00	4.40	4.80	5.20	5.60	6.00
Ancho (B) [m]	2.80	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004	0.004	0.005
	3.50	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.006	0.007
	4.20	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.005	0.006	0.008
	4.90	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.005	0.006	0.007
	5.60	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.006	0.007

Tabla A. 5 Matriz de límites de confort de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 1A ($f'c=250\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=5\%$

B [m]	L [m]	fn [Hz]	Po [Kg]	β	No. Viguetas	w [Kg/m ²]	W [Kg]	ao/g max	ap/g
2.8	3.2	19.88	29.56	0.04	3	219.4	1966	0.005	0.0004
2.8	3.6	16.97	29.56	0.04	3	219.4	2212	0.005	0.0009
2.8	4.0	13.42	29.56	0.04	3	219.4	2458	0.005	0.0027
2.8	4.4	12.31	29.56	0.04	3	219.4	2703	0.005	0.0037
2.8	4.8	11.01	29.56	0.04	3	219.4	2949	0.005	0.0053
2.8	5.2	9.89	29.56	0.04	3	219.4	3195	0.005	0.0073
2.8	5.6	8.97	29.56	0.04	3	219.4	3441	0.005	0.0093
2.8	6.0	8.23	29.56	0.04	3	219.4	3686	0.005	0.0113
3.5	3.2	15.17	29.56	0.04	4	221.7	2483	0.005	0.0015
3.5	3.6	14.10	29.56	0.04	4	221.7	2793	0.005	0.0019
3.5	4.0	12.90	29.56	0.04	4	221.7	3103	0.005	0.0026
3.5	4.4	11.44	29.56	0.04	4	221.7	3414	0.005	0.0039
3.5	4.8	10.09	29.56	0.04	4	221.7	3724	0.005	0.0058
3.5	5.2	8.96	29.56	0.04	4	221.7	4034	0.005	0.0080
3.5	5.6	8.03	29.56	0.04	4	221.7	4344	0.005	0.0102
3.5	6.0	7.27	29.56	0.04	4	221.7	4655	0.005	0.0125
4.2	3.2	14.62	29.56	0.04	5	223.1	2999	0.005	0.0015
4.2	3.6	13.67	29.56	0.04	5	223.1	3374	0.005	0.0018
4.2	4.0	12.37	29.56	0.04	5	223.1	3749	0.005	0.0026
4.2	4.4	10.89	29.56	0.04	5	223.1	4124	0.005	0.0040
4.2	4.8	9.56	29.56	0.04	5	223.1	4499	0.005	0.0058
4.2	5.2	8.45	29.56	0.04	5	223.1	4873	0.005	0.0079
4.2	5.6	7.53	29.56	0.04	5	223.1	5248	0.005	0.0101
4.2	6.0	6.77	29.56	0.04	5	223.1	5623	0.005	0.0123
4.9	3.2	14.14	29.56	0.04	6	224.2	3516	0.005	0.0015
4.9	3.6	13.28	29.56	0.04	6	224.2	3955	0.005	0.0018
4.9	4.0	11.99	29.56	0.04	6	224.2	4394	0.005	0.0025
4.9	4.4	10.55	29.56	0.04	6	224.2	4834	0.005	0.0038
4.9	4.8	9.24	29.56	0.04	6	224.2	5273	0.005	0.0055
4.9	5.2	8.14	29.56	0.04	6	224.2	5713	0.005	0.0075
4.9	5.6	7.23	29.56	0.04	6	224.2	6152	0.005	0.0096
4.9	6.0	6.47	29.56	0.04	6	224.2	6592	0.005	0.0116
5.6	3.2	13.78	29.56	0.04	7	225.0	4032	0.005	0.0015
5.6	3.6	12.97	29.56	0.04	7	225.0	4536	0.005	0.0017
5.6	4.0	11.73	29.56	0.04	7	225.0	5040	0.005	0.0024
5.6	4.4	10.31	29.56	0.04	7	225.0	5544	0.005	0.0036
5.6	4.8	9.03	29.56	0.04	7	225.0	6048	0.005	0.0052
5.6	5.2	7.94	29.56	0.04	7	225.0	6552	0.005	0.0070
5.6	5.6	7.03	29.56	0.04	7	225.0	7056	0.005	0.0089
5.6	6.0	6.28	29.56	0.04	7	225.0	7560	0.005	0.0108
6.0	3.2	13.63	29.56	0.04	8	227.6	4370	0.005	0.0014
6.0	3.6	12.85	29.56	0.04	8	227.6	4916	0.005	0.0017
6.0	4.0	11.63	29.56	0.04	8	227.6	5462	0.005	0.0023
6.0	4.4	10.24	29.56	0.04	8	227.6	6009	0.005	0.0034
6.0	4.8	8.96	29.56	0.04	8	227.6	6555	0.005	0.0049
6.0	5.2	7.88	29.56	0.04	8	227.6	7101	0.005	0.0066
6.0	5.6	6.97	29.56	0.04	8	227.6	7647	0.005	0.0084
6.0	6.0	6.22	29.56	0.04	8	227.6	8194	0.005	0.0102

Tabla A. 6 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 2 ($f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=4\%$

B [m]	L [m]	fn [Hz]	Po [Kg]	β	No. Viguetas	w [Kg/m ²]	W [Kg]	ao/g max	ap/g
2.8	3.2	19.88	29.56	0.05	3	219.4	1966	0.005	0.0003
2.8	3.6	16.97	29.56	0.05	3	219.4	2212	0.005	0.0007
2.8	4.0	13.42	29.56	0.05	3	219.4	2458	0.005	0.0022
2.8	4.4	12.31	29.56	0.05	3	219.4	2703	0.005	0.0029
2.8	4.8	11.01	29.56	0.05	3	219.4	2949	0.005	0.0042
2.8	5.2	9.89	29.56	0.05	3	219.4	3195	0.005	0.0058
2.8	5.6	8.97	29.56	0.05	3	219.4	3441	0.005	0.0074
2.8	6.0	8.23	29.56	0.05	3	219.4	3686	0.005	0.0090
3.5	3.2	15.17	29.56	0.05	4	221.7	2483	0.005	0.0012
3.5	3.6	14.10	29.56	0.05	4	221.7	2793	0.005	0.0015
3.5	4.0	12.90	29.56	0.05	4	221.7	3103	0.005	0.0021
3.5	4.4	11.44	29.56	0.05	4	221.7	3414	0.005	0.0032
3.5	4.8	10.09	29.56	0.05	4	221.7	3724	0.005	0.0046
3.5	5.2	8.96	29.56	0.05	4	221.7	4034	0.005	0.0064
3.5	5.6	8.03	29.56	0.05	4	221.7	4344	0.005	0.0082
3.5	6.0	7.27	29.56	0.05	4	221.7	4655	0.005	0.0100
4.2	3.2	14.62	29.56	0.05	5	223.1	2999	0.005	0.0012
4.2	3.6	13.67	29.56	0.05	5	223.1	3374	0.005	0.0015
4.2	4.0	12.37	29.56	0.05	5	223.1	3749	0.005	0.0021
4.2	4.4	10.89	29.56	0.05	5	223.1	4124	0.005	0.0032
4.2	4.8	9.56	29.56	0.05	5	223.1	4499	0.005	0.0046
4.2	5.2	8.45	29.56	0.05	5	223.1	4873	0.005	0.0063
4.2	5.6	7.53	29.56	0.05	5	223.1	5248	0.005	0.0081
4.2	6.0	6.77	29.56	0.05	5	223.1	5623	0.005	0.0098
4.9	3.2	14.14	29.56	0.05	6	224.2	3516	0.005	0.0012
4.9	3.6	13.28	29.56	0.05	6	224.2	3955	0.005	0.0014
4.9	4.0	11.99	29.56	0.05	6	224.2	4394	0.005	0.0020
4.9	4.4	10.55	29.56	0.05	6	224.2	4834	0.005	0.0031
4.9	4.8	9.24	29.56	0.05	6	224.2	5273	0.005	0.0044
4.9	5.2	8.14	29.56	0.05	6	224.2	5713	0.005	0.0060
4.9	5.6	7.23	29.56	0.05	6	224.2	6152	0.005	0.0077
4.9	6.0	6.47	29.56	0.05	6	224.2	6592	0.005	0.0093
5.6	3.2	13.78	29.56	0.05	7	225.0	4032	0.005	0.0012
5.6	3.6	12.97	29.56	0.05	7	225.0	4536	0.005	0.0014
5.6	4.0	11.73	29.56	0.05	7	225.0	5040	0.005	0.0019
5.6	4.4	10.31	29.56	0.05	7	225.0	5544	0.005	0.0029
5.6	4.8	9.03	29.56	0.05	7	225.0	6048	0.005	0.0041
5.6	5.2	7.94	29.56	0.05	7	225.0	6552	0.005	0.0056
5.6	5.6	7.03	29.56	0.05	7	225.0	7056	0.005	0.0071
5.6	6.0	6.28	29.56	0.05	7	225.0	7560	0.005	0.0087
6.0	3.2	13.63	29.56	0.05	8	227.6	4370	0.005	0.0011
6.0	3.6	12.85	29.56	0.05	8	227.6	4916	0.005	0.0013
6.0	4.0	11.63	29.56	0.05	8	227.6	5462	0.005	0.0018
6.0	4.4	10.24	29.56	0.05	8	227.6	6009	0.005	0.0027
6.0	4.8	8.96	29.56	0.05	8	227.6	6555	0.005	0.0039
6.0	5.2	7.88	29.56	0.05	8	227.6	7101	0.005	0.0053
6.0	5.6	6.97	29.56	0.05	8	227.6	7647	0.005	0.0067
6.0	6.0	6.22	29.56	0.05	8	227.6	8194	0.005	0.0082

Tabla A. 7 Resultados de aceleración de las losas frente a límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 2 ($f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=5\%$

		Largo (L) [m]							
		3.20	3.60	4.00	4.40	4.80	5.20	5.60	6.00
Ancho (B) [m]	2.80	0.0004	0.0009	0.0027	0.0037	0.0053	0.0073	0.0093	0.0113
	3.50	0.0015	0.0019	0.0026	0.0039	0.0058	0.0080	0.0102	0.0125
	4.20	0.0015	0.0018	0.0026	0.0040	0.0058	0.0079	0.0101	0.0123
	4.90	0.0015	0.0018	0.0025	0.0038	0.0055	0.0075	0.0096	0.0116
	5.60	0.0015	0.0017	0.0024	0.0036	0.0052	0.0070	0.0089	0.0108
	6.00	0.0014	0.0017	0.0023	0.0034	0.0049	0.0066	0.0084	0.0102

Tabla A. 8 Matriz de límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 2 ($f'c=200\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=4\%$

		Largo (L) [m]							
		3.20	3.60	4.00	4.40	4.80	5.20	5.60	6.00
Ancho (B) [m]	2.80	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.007	0.009
	3.50	0.001	0.002	0.002	0.003	0.005	0.006	0.008	0.010
	4.20	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.006	0.008	0.010
	4.90	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.008	0.009
	5.60	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.007	0.009
	6.00	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.007	0.008

Tabla A. 9 Matriz de límites de confort de acuerdo a Murray et al. (2003), para un concreto clase 2 ($f'c=250\text{kg/cm}^2$) y amortiguamiento $\beta=5\%$

ANEXO M. Código Python para generación de mapas de calor

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.colors as mcolors
from scipy.interpolate import RegularGridInterpolator
from matplotlib.colors import TwoSlopeNorm
import matplotlib.ticker as mticker
from matplotlib.patches import Patch

# =====
# CARGAR DATOS DESDE EXCEL
# =====

file_path = 'Matriz simplificada B3.xlsx'
df = pd.read_excel(file_path, index_col=0)

B = df.index.values # Ancho (B) (primer columna como índice)
L = df.columns.values # Largo (L) (primer fila como columnas)
V = df.values # Los valores de la matriz de datos

# =====
# INTERPOLACIÓN
# =====
f_interp = RegularGridInterpolator((B, L), V)

# =====
# MALLA FINA
# =====
L_vals = np.linspace(L.min(), L.max(), 300)
B_vals = np.linspace(B.min(), B.max(), 300)
L_grid, B_grid = np.meshgrid(L_vals, B_vals)
points = np.array([B_grid.ravel(), L_grid.ravel()]).T
V_grid = f_interp(points).reshape(B_grid.shape)

# =====
# FRONTERA (V ≈ 0.005)
# =====
```

```
mask = np.isclose(V_grid, 0.005, atol=0.0002)
L_border = L_grid[mask]
B_border = B_grid[mask]

# =====
# COLORMAP
# =====

base_cmap = plt.cm.bwr

colors = np.vstack((
    base_cmap(np.linspace(0, 0.49, 128)),
    base_cmap(np.linspace(0.51, 1.00, 128))
))
cmap_narrow = mcolors.LinearSegmentedColormap.from_list("narrow_RdYIGn",
    colors)

# =====
# NORMALIZACIÓN CENTRADA
# =====

vmin = V_grid.min()
vmax = V_grid.max()
vcenter = 0.005
norm = TwoSlopeNorm(vmin=vmin, vcenter=vcenter, vmax=vmax)

# =====
# GRÁFICO FINAL
# =====

fig, ax = plt.subplots(figsize=(8,6))

cf = ax.contourf(L_grid, B_grid, V_grid, levels=80, cmap=cmap_narrow, norm=norm)
cbar = plt.colorbar(cf, ax=ax)
cbar.ax.yaxis.set_major_formatter(mticker.FormatStrFormatter('%.3f'))

# =====
# AJUSTE POLINÓMICO DE LA FRONTERA
# =====

idx = np.argsort(B_border)
```

```

B_sorted = B_border[idx]
L_sorted = L_border[idx]

# Ajuste polinómico
grado_polinomio = 2
poly_polinomico = np.poly1d(np.polyfit(B_sorted, L_sorted, grado_polinomio))
coeficientes = np.polyfit(B_sorted, L_sorted, grado_polinomio)

# Graficar ajuste polinómico
B_smooth = np.linspace(B_sorted.min(), B_sorted.max(), 300)
line = ax.plot(poly_polinomico(B_smooth), B_smooth, color='k', linewidth=2)

# =====
# LEYENDA
# =====
color_legend = [
    Patch(facecolor='blue', alpha=0.4, label='Sin revisión dinámica'),
    Patch(facecolor='red', alpha=0.4, label='Revisión dinámica')
]
line_legend = [Patch(facecolor='k', label='Ajuste Polinómico')]

ax.legend(handles=color_legend + line_legend, loc='upper left', title='Leyenda')

# =====
# ETIQUETAS Y TÍTULO
# =====
ax.set_xlabel('Largo (m)')
ax.set_ylabel('Ancho (m)')
ax.set_title("Frontera de análisis dinámico concreto clase 1A y β=3%")

# =====
# REJILLA FINA
# =====
ax.grid(True, which='both', axis='both', linestyle='--', linewidth=0.5)
ax.set_xticks(np.arange(L.min(), L.max(), 0.1), minor=True)
ax.set_yticks(np.arange(B.min(), B.max(), 0.1), minor=True)
ax.tick_params(axis='both', which='minor', length=0)
ax.set_xlim(L.min(), L.max())

```

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

```
ax.set_ylim(B.min(), B.max())

plt.show()

# Guardar la figura
fig.savefig('Grafica_Calor_B3%.png', dpi=300, bbox_inches='tight')
```



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS