

**Universidad de Costa Rica**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Determinación de la rigidez efectiva en una vivienda de mampostería de concreto  
integral a partir de mediciones de vibraciones ambientales**

Proyecto de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

**Albert Josué Vásquez Rodríguez**

Director de Proyecto de Graduación

**Dr. Ing. Diego A. Hidalgo-Leiva**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

**Integrantes del comité asesor**



Dr. Ing. Diego A. Hidalgo-Leiva

Director



Ing. Víctor Schmidt Díaz, PhD

Asesor



Ing. Luis Carlos Esquivel Salas

Asesor



Albert Josué Vásquez Rodríguez

Estudiante

**Fecha:** 2019, Abril, 24

El suscrito, **Albert Vásquez Rodríguez**, cédula 1-1422-0779, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B06724**, manifiesta que es autor del Proyecto de Graduación "**Determinación de la rigidez efectiva en una vivienda de mampostería de concreto integral a partir de mediciones de vibraciones ambientales**", bajo la dirección del **Dr. Ing. Diego A. Hidalgo-Leiva**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

**Nota:** De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

**DEDICATORIA**

Juanita Vásquez Rodríguez, mi madre, la persona más maravillosa que conozco. Sin su amor y motivación a lo largo de todos estos años no lo hubiera logrado.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por regalarme el don de la vida.

A mi madre, por su esfuerzo y cariño para brindarme la mejor herencia, el estudio.

A Rafa, Su, Warren y Diego, mis hermanos, que, a pesar de la distancia siempre han sido solidarios y atentos a brindarme su apoyo.

Al Ing. Diego Hidalgo-Leiva, mi Director de Tesis, gracias Profesor por su acompañamiento a lo largo de este Proyecto, por los conocimientos que ha compartido conmigo, y en especial, le agradezco la paciencia con este servidor.

A mis asesores, los ingenieros Víctor Schmidt y Luis Carlos Esquivel. A ambos les agradezco por el conocimiento compartido, así como por la confianza y el tiempo que invirtieron en el proyecto.

A don Álvaro Poveda, por el conocimiento compartido en lo que respecta al sistema constructivo de la mampostería, de gran utilidad cuando comencé el presente proyecto.

A Esteban Cordero, asistente técnico del LIS-UCR, le agradezco su gran colaboración en cada una de las mediciones efectuadas en las viviendas.

A don Mauricio Carranza, mi jefe, por brindarme la posibilidad de alternar el trabajo con el estudio.

A Richard Godfrey, compañero de la universidad, quien me brindó su ayuda no solo con el Trabajo de Graduación, sino también a lo largo de la carrera, una excelente persona.

## Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación.....	1
1.1.1 Problema específico.....	1
1.1.2 Importancia.....	2
1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	3
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo general.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 Delimitación del problema.....	5
1.3.1 Alcance.....	5
1.3.2 Limitaciones.....	6
1.4 Metodología.....	7
1.4.1 Etapa teórica.....	8
1.4.2 Etapa experimental.....	9
1.4.3 Etapa de análisis de resultados.....	10
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Sistema constructivo.....	12
2.2 Modelación estructural.....	13
2.2.1 Método de modelación del marco equivalente.....	13
2.2.2 Momento de inercia de masa.....	15
2.3 Mediciones de vibraciones ambientales.....	16
2.4 Generalidades en la dinámica de estructuras.....	16
2.4.1 Grados de libertad de una estructura.....	16
2.4.2 Periodo y frecuencia natural de vibración.....	18
2.4.3 Centro de masa y centro de rigidez.....	19

2.4.3.1 Centro de masa .....	19
2.4.3.2 Centro de rigidez.....	20
2.5 Análisis modal.....	20
2.5.1 Espectros de Fourier .....	22
2.5.2 Funciones de densidad espectral .....	22
2.5.3 Función de autocorrelación .....	23
2.5.4 Funciones de densidad autoespectral.....	23
2.5.5 Funciones de espectros cruzados.....	23
2.5.6 Funciones de potencia unilaterales.....	24
2.5.7 Función de transferencia.....	24
2.5.7 Función de coherencia .....	25
2.6 Métodos de análisis modal .....	25
2.6.1 Método básico en el dominio de la frecuencia .....	25
2.6.2 Método de descomposición en el dominio de la frecuencia .....	26
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	27
3.1 Modelación de la estructura .....	27
3.1.1 Generalidades del sistema estructural .....	27
3.1.2 Características de las viviendas.....	29
3.1.3 Modelación de la estructura .....	32
3.1.4 Propiedades de los materiales .....	33
3.1.5 Cargas aplicadas en la estructura .....	33
3.1.5.1 Sistema de entepiso.....	33
3.1.5.2 Sistema de techo .....	35
3.2 Medición en sitio de vibraciones ambientales .....	37
3.2.1 Caracterización del equipo utilizado .....	37
3.2.2 Metodología para efectuar las pruebas en sitio.....	41

3.3 Procesamiento de análisis espectral .....	49
3.3.1 Tratamiento de las señales obtenidas en campo .....	49
3.3.1.1 Extracción de datos y aplicación de unidades.....	50
3.3.1.2 Sincronización y ventanas de corte .....	50
3.3.1.3 Corrección de línea base y eliminación de tendencia.....	51
3.3.1.4 Filtrado y acotado .....	51
3.5 Prueba H/V .....	59
3.6 Calibración del modelo.....	61
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
4.1 Comparación entre resultados teóricos y resultados experimentales .....	65
4.2 Comparación de los resultados obtenidos entre ambas viviendas.....	67
4.2.1 Comparación de M1V1 con respecto a la M1V2 .....	67
4.2.2 Comparación de M2V1 con respecto a la M1V2 .....	69
4.3 Dificultad en la obtención de las frecuencias naturales y formas modales en estructuras muy rígidas .....	71
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
5.1 Conclusiones.....	74
5.2 Recomendaciones .....	76
6. BIBLIOGRAFÍA .....	78
APÉNDICE A: CÁLCULOS DE CENTROS DE MASAS, CENTROS DE RIGIDEZ Y EXCENTRICIDADES.....	81
APÉNDICE B: PROGRAMACIÓN PARA OBTENCIÓN DE TRANSFORMADA DE FOURIER Y ESPECTROS CRUZADOS.....	87

## Tabla de Figuras

<b>Figura 1.</b> Metodología propuesta para el desarrollo del trabajo. ....	7
<b>Figura 2.</b> Idealización del marco equivalente en el caso de aberturas regularmente distribuidas. ....	14
<b>Figura 3.</b> Momento de inercia de masa de cuerpo rígido. ....	15
<b>Figura 4.</b> Configuración de momento de inercia de masa para un rectángulo. ....	16
<b>Figura 5.</b> Simplificación de un sistema estructural de varios grados de libertad. ....	17
<b>Figura 6.</b> Idealización de una estructura con diafragma rígido a nivel de entrepiso. ....	17
<b>Figura 7.</b> Sistema masa-resorte-amortiguador. ....	18
<b>Figura 8.</b> Efectos torsionales producto de las fuerzas laterales. ....	19
<b>Figura 9.</b> Vibración libre de un sistema clásicamente amortiguado en el primer modo de vibración natural. ....	21
<b>Figura 10.</b> Vibración libre de un sistema clásicamente amortiguado en el segundo modo de vibración natural. ....	21
<b>Figura 11.</b> Aplicación de la Transformada de Fourier. ....	22
<b>Figura 12.</b> Representación gráfica de la teoría de análisis modal. ....	26
<b>Figura 13.</b> Detalle de entrepiso de la vivienda. ....	28
<b>Figura 14.</b> Vista frontal de la vivienda tipo AC-2C ubicada en Avenir Condominio. ....	30
<b>Figura 15.</b> Ubicación espacial del Proyecto Avenir Condominio, Santo Domingo de Heredia. ....	31
<b>Figura 16.</b> Ubicación espacial de las edificaciones dentro del Proyecto Avenir Condominio. ....	31
<b>Figura 17.</b> (a) Vista en perspectiva de la estructura. (b) Modelación de la estructura aplicando la teoría del marco equivalente. ....	32
<b>Figura 18.</b> Carga de entrepiso aplicada en el centro de masa de la estructura. ....	35
<b>Figura 19.</b> Carga de techo distribuida por área tributaria. ....	37
<b>Figura 20.</b> Acelerógrafo Guralp para medir vibraciones ambientales. ....	38
<b>Figura 21.</b> Acelerógrafo TitanSMA para medir vibraciones ambientales. ....	39
<b>Figura 22.</b> Configuración de un sismógrafo. ....	40
<b>Figura 23.</b> Medición de la frecuencia del suelo con el sismógrafo Lennartz (a) Zona posterior de la vivienda (b) Punto cercano a la propiedad donde se ubica la vivienda. ....	41
<b>Figura 24.</b> Esquema de ubicación en planta del acelerógrafo ubicado en el Nivel 1 (Proyección del Centro de masa). ....	43

<b>Figura 25.</b> Esquema de ubicación en planta de acelerógrafos ubicados en el Nivel 2 (Centro de rigidez y extremos).....	44
<b>Figura 26.</b> Esquema de ubicación en elevación de los acelerógrafos empleados en la medición de la vivienda 1.....	45
<b>Figura 27.</b> Esquema de ubicación en elevación de los acelerógrafos empleados en la medición de la vivienda 2.....	45
<b>Figura 28.</b> M1V1, a) Equipo de medición ubicado en el Nivel 1. b) Equipo de medición ubicado en el centro de rigidez. c) Equipo de medición ubicado en el extremo 1.....	47
<b>Figura 29.</b> M2V1, a) Equipo de medición ubicado en el Nivel 1. b) Equipo de medición ubicado en el centro de rigidez. c) Equipo de medición ubicado en el extremo 2.....	48
<b>Figura 30.</b> M1V2, a) Equipo de medición ubicado en el Nivel 1. b) Equipo de medición ubicado en el centro de rigidez. c) Equipo de medición ubicado en el extremo 1.....	49
<b>Figura 31.</b> Línea base corregida y eliminación de tendencia de señal registrada en el sensor ubicado en el Nivel 0 de la estructura .....	51
<b>Figura 32.</b> Espectros de Fourier y espectros cruzados obtenidas de la M1V1 en las direcciones (a) N-S (b) E-O .....	54
<b>Figura 33.</b> Espectros de Fourier y espectros cruzados obtenidas de la M2V1 en las direcciones (a) N-S (b) E-O .....	55
<b>Figura 34.</b> Espectros de Fourier y sus espectros cruzados de la medición efectuada en la vivienda 2 (a) Dirección E-O (b) Dirección N-S.....	56
<b>Figura 35.</b> Espectros cruzados promedio sin suavizar y suavizados de la medición efectuada en la vivienda 2 (a) Dirección E-O (b) Dirección N-S.....	57
<b>Figura 36.</b> Espectros cruzados de potencia promedio de la medición efectuada en la vivienda 2 (a) Dirección E-O (b) Dirección N-S.....	58
<b>Figura 37.</b> Autoespectro en la dirección E-O obtenido de la prueba rotacional en la vivienda 1. ....	58
<b>Figura 38.</b> Resultados de la frecuencia natural del suelo. ....	60
<b>Figura 40.</b> Forma modal de la frecuencia obtenida del ajuste (a) Deformación en el sentido "y" positivo (b) Deformación en el sentido "y" negativo .....	63
<b>Figura 41.</b> Forma modal de la frecuencia obtenida del ajuste (a) Deformación en el sentido "x" negativo (b) Deformación en el sentido "x" positivo .....	63

<b>Figura 42.</b> Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión de los prismas de mampostería con y sin concreto de relleno .....	64
<b>Figura 43.</b> Autoespectro en la dirección N-S obtenido de la prueba traslacional en la vivienda 2. ....	66
<b>Figura 44.</b> Autoespectro en la dirección E-O obtenido de la prueba traslacional en la vivienda 2. ....	67
<b>Figura 45.</b> Comparación de razones espectrales entre M1V1 y M1V2 (Dirección x). ....	68
<b>Figura 46.</b> Comparación de razones espectrales entre M1V1 y M1V2 (Dirección y). ....	69
<b>Figura 47.</b> Comparación de razones espectrales entre M2V1 y M1V2 (Dirección x). ....	70
<b>Figura 48.</b> Comparación de razones espectrales entre M2V1 y M1V2 (Dirección y). ....	71
<b>Figura 49.</b> Espectros de Fourier y Funciones de Transferencia para un edificio.....	73
Fuente: Esquivel, Schmidt, 2016.....	73
<b>Figura A.1</b> Distribución de paredes en el Nivel 1 de la vivienda.....	85
<b>Figura A.2</b> Distribución de paredes en el Nivel 2 de la vivienda.....	86

## Tabla de Cuadros

Cuadro 1. Generalidades del sistema estructural. ....	27
Cuadro 2. Características generales y estructurales de las viviendas. ....	29
Cuadro 3. Propiedades de desempeño de los materiales que componen la estructura. ....	33
Cuadro 4. Carga permanente y carga temporal del entrepiso. ....	34
Cuadro 5. Carga permanente y carga temporal del entrepiso. ....	36
Cuadro 6. Características de las pruebas de vibración ambiental en la vivienda uno (Guralp). .....	47
Cuadro 7. Características de las pruebas de vibración ambiental en la vivienda 2 (Nanometrics).....	48
Cuadro 8. Constantes de calibración de los sensores Guralp.....	50
Cuadro 8. Periodo y porcentajes de masa efectiva obtenidos del modelo sin calibrar.....	61
Cuadro 9. Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad promedio para cada tipo de prisma de mampostería. ....	62
Cuadro 10. Periodo y porcentajes de masa efectiva obtenidos del modelo calibrado a partir de parámetros del prisma tipo SR-1. ....	62
Cuadro A1. Cálculo del centro de rigidez en dirección de los ejes longitudinales (eje x). ....	81
Cuadro A2. Cálculo del centro de rigidez en dirección de los ejes transversales (eje y). ....	82
Cuadro A3. Cálculo del centro de masa en muros del primer nivel. ....	82
Cuadro A4. Cálculo del centro de masa en muros del segundo nivel. ....	83
Cuadro A5. Cargas de diseño consideradas en el sistema de entrepiso.....	83
Cuadro A6. Cálculo del centro de masa de la estructura. ....	84
Cuadro A7. Excentricidad y tipo de regularidad de la vivienda. ....	84

**INDICE DE ABREVIATURAS**

A	Área de la sección transversal
a	Lado corto de la planta de entrepiso
$B_{\text{efect}}$	Ancho tributario efectivo
b	Lado largo de la planta de entrepiso
E	Módulo de elasticidad
$e_x$	Excentricidad en el eje x
$e_y$	Excentricidad en el eje y
F	Factor de conversión de unidades
f	Frecuencia cíclica
$f_n$	Frecuencia natural de vibración
GDL	Grado de libertad
$G_{xx}(f)$	Función de densidad del autoespectro unilateral de la señal de entrada
$G_{xy}(f)$	Función de densidad del espectro cruzado unilateral de la señal de entrada
$G_{yy}(f)$	Función de densidad del autoespectro unilateral de la señal de salida
H(f)	Función de transferencia en un sistema lineal
i	Contador para elementos estructurales
$I_{xx}$	Momento de inercia respecto al eje x
$I_{yy}$	Momento de inercia respecto al eje y
$K_i$	Rigidez lateral del elemento estructural i
$K_{xx}$	Rigidez lateral del elemento estructural x en la dirección x
$K_{yy}$	Rigidez lateral del elemento estructural y en la dirección y
M	Masa del sistema de entrepiso

$R_{xx}(t)$	Función de autocorrelación de la señal de entrada
$R_{xy}(t)$	Función de correlación cruzada entre dos señales distintas
$S_{xx}(f)$	Función de densidad del autoespectro de bilateral de la señal de entrada
$S_{xy}(f)$	Función de densidad del espectro cruzado bilateral entre dos señales distintas
$t$	Variable de tiempo continuo
$T_n$	Periodo natural de vibración
$x$	Variable espacial de dirección
$X_{CM}$	Coordenada en dirección $x$ del centro de masa en la planta
$X_{CR}$	Coordenada en dirección $x$ del centro de rigidez en la planta
$x(t)$	Variable dependiente del tiempo
$y$	Variable espacial de dirección
$Y_{CM}$	Coordenada en dirección $y$ del centro de masa en la planta
$Y_{CR}$	Coordenada en dirección $y$ del centro de rigidez en la planta
$y(t)$	Variable dependiente del tiempo
$w$	Carga distribuida por metro cuadrado
$W$	Peso
$W_{zz}$	Momento de inercia de masa respecto al eje $z$
$\gamma_{xy}^2$	Función de coherencia entre dos señales
ASTM	American Society for Testing and Materials
BFD	Básico en el dominio de la frecuencia
CFIA	Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos
CSCR-10	Código Sísmico de Costa Rica 2010
FFT	Transformada Rápida de Fourier

GPS	Sistema de posicionamiento global
LIS-UCR	Laboratorio de Ingeniería Sísmica
MCI	Mampostería de concreto integral
MVA	Mediciones de Vibraciones Ambientales
UCR	Universidad de Costa Rica

Vásquez Rodríguez, Albert Josué

Determinación de la rigidez efectiva en una vivienda de mampostería de concreto integral a partir de mediciones de vibraciones ambientales

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:

A. Vásquez R., 2019

xv, 78, [8]h; ils. col. - 32 refs.

#### Resumen

El proyecto consiste en la identificación de frecuencias naturales asociadas a una vivienda de mampostería de concreto integral de dos niveles a partir de mediciones de vibraciones ambientales. Mediante el procesamiento de las señales obtenidas en campo y la teoría del análisis espectral se identificaron las frecuencias de vibración asociadas a la estructura. El método utilizado para el análisis modal es el método básico en el dominio de la frecuencia.

Las señales de aceleraciones registradas en campo se obtuvieron haciendo uso de acelerógrafos triaxiales marca Guralp y Nanometrics, los cuales fueron suministrados por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica. Se diseñaron dos pruebas para la identificación de las frecuencias naturales de la vivienda, una asociada a los modos de flexión y otra para los modos de torsión. El procesamiento de las señales para la obtención de los resultados experimentales se llevó a cabo mediante el programa computacional Matlab. Se desarrolló un modelo estructural de la vivienda aplicando el método de modelación del marco equivalente, esto con el fin de calibrar dicho modelo a partir de la frecuencia natural experimental asociada al primer modo traslacional de la estructura.

A partir del procesamiento de las señales medidas en campo se obtuvo una frecuencia de 15,0 Hz asociada a un modo traslacional de la estructura, específicamente, la forma modal en dirección del eje débil de la vivienda. En general, se considera que la poca energía espectral asociada a las vibraciones ambientales que experimenta la vivienda, así como la alta rigidez de la estructura, dificulta la lectura satisfactoria de los espectros obtenidos.

AVR.

Conceptos clave: Análisis espectral, dinámica de estructuras, frecuencia natural, mampostería, modelación estructural, vibraciones ambientales.

Dr. Ing. Diego A. Hidalgo-Leiva

Escuela de Ingeniería Civil



## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Justificación**

#### ***1.1.1 Problema específico***

Con el objetivo de realizar una definición más precisa de las características dinámicas de las estructuras que emplean la Mampostería de Concreto Integral (MCI), surge la necesidad de obtener una estimación detallada de la rigidez elástica efectiva. Se plantea modelar la tipología estructural mediante una vivienda unifamiliar de dos niveles con entrepiso rígido, construida bajo el sistema de MCI de acuerdo con lo que dicta el Código Sísmico de Costa Rica 2010.

Se analiza una vivienda construida bajo el sistema de Mampostería de Concreto Integral por tratarse de unos de los métodos constructivos que se utilizan con mayor frecuencia en nuestro país, especialmente por aquellas empresas constructoras de viviendas a gran escala, como es el caso de la empresa Vivicon. En general, este sistema implica que tanto el refuerzo horizontal como el vertical quedan embebidos en los bloques de mampostería.

El Código Sísmico recomienda valores estándar para definir la inercia agrietada de los elementos de una estructura (CSCR, 2010). Si bien es cierto, por tratarse de una recomendación establecida por un código de diseño se esperan resultados confiables, no es posible aseverar que dicha propuesta sea representativa en general para cualquier estructura.

La identificación de la rigidez elástica efectiva de la estructura de MCI se puede obtener a partir de mediciones de vibraciones ambientales registradas por acelerógrafos. Además de las mediciones tomadas, se requiere contar con la información suficiente relacionada con el diseño estructural y la calidad constructiva de la vivienda seleccionada.

Un modelo estructural calibrado, es decir, uno cuyos periodos traslacionales en cada dirección ortogonal de la estructura se encuentren ajustados respecto a los periodos definidos con el análisis de las mediciones ambientales, consiste en una herramienta útil para realizar un estudio de vulnerabilidad sísmica. Es de esperarse que con este método se obtengan resultados más precisos que las recomendaciones del código, pues el modelo, al

ser calibrado mediante mediciones realizadas directamente sobre la estructura, se considera que representa de mejor manera las condiciones reales de la misma.

### ***1.1.2 Importancia***

Con respecto al sistema constructivo seleccionado para llevar a cabo la investigación, las viviendas que utilizan como principal material en el sistema sismorresistente la MCI, representan un tipo estructural que se está construyendo con frecuencia en nuestro país por parte de las empresas constructoras de edificaciones residenciales, quienes buscan disminuir los desperdicios de materiales debido a la falta de modulación en las estructuras.

El grado de rigidez de una estructura es una variable que se relaciona directamente con su comportamiento dinámico, donde a mayor rigidez es de esperarse un menor valor en el periodo de oscilación de la estructura, y viceversa, cuanto menos rígida sea la estructura mayor es el periodo de oscilación de la misma. Resulta importante verificar que las variables dinámicas obtenidas como respuesta de las vibraciones de la estructura de MCI coincidan con los valores asociados al tipo de estructura teórica diseñada, en este caso particular, una estructura tipo muro.

El método de mediciones de vibraciones ambientales (MVA) en estructuras recién construidas permite constatar los parámetros dinámicos obtenidos del procesamiento de las señales con los valores teóricos empleados en el diseño de dichas estructuras, de manera que sea posible determinar la existencia de modificaciones importantes entre el diseño y la construcción.

Como una herramienta eficaz para realizar una revisión o reforzamiento estructural de una vivienda de MCI se puede emplear un modelo debidamente depurado que represente de una manera fidedigna las condiciones reales de la estructura. Para cumplir este objetivo se debe considerar la rigidez elástica que efectivamente posee la vivienda, es decir, se deben tomar en cuenta los efectos de disminución de rigidez teórica a causa de micro-agrietamiento en los elementos sismorresistentes o a una concepción errónea en el comportamiento elástico del material compuesto. La disponibilidad de un modelo estructural calibrado permite y facilita cualquier análisis o revisión estructural que se requiera realizar en el futuro del edificio.

### ***1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema***

En torno a las propiedades del material a analizar, el cual consiste en mampostería de bloques de concreto, Navas (2007) estudia el efecto de la resistencia a la compresión de los bloques, el mortero de pega y el concreto de relleno. Una de las principales conclusiones que obtiene el autor es que la resistencia a compresión de la mampostería está directamente relacionada a la resistencia a compresión de los bloques de concreto. Se considera dicho artículo como un importante insumo para la caracterización de los materiales involucrados en el trabajo de investigación a desarrollar.

La determinación de parámetros dinámicos en estructuras de baja altura es un tema que ha sido poco investigado hasta la fecha. Carrillo (2009) presentó un artículo titulado "Estimación de los periodos naturales de vibración de viviendas de baja altura con muros de concreto", en el cual investigó los periodos de vibración de edificaciones de uno y dos niveles con configuraciones típicas de viviendas en México. El investigador empleó dos técnicas de modelación estructural, el método de elemento finito y el método de la columna ancha. Finalmente, realizó una comparación entre los resultados obtenidos de la modelación con los obtenidos a partir de las pruebas experimentales de vibración ambiental.

Con respecto al tema de vibraciones ambientales, uno de los trabajos de investigación del que se puede extraer información para el presente proyecto de graduación, consiste en el Trabajo Final de Graduación titulado "Análisis de vibraciones provocadas por la acción de caminar en entresijos de sección compuesta", realizada por Esquivel (2012). En este el autor estudió métodos teóricos sobre análisis de vibraciones ambientales. Se trazó como objetivo determinar cuál de los métodos teóricos se ajustaba mejor a la respuesta vibratoria verdadera de un entresijo. A manera de conclusión se obtiene que el método de Murray (Murray, 2000) es el que presenta menor porcentaje de error asociado en el cálculo de la frecuencia natural.

Uno de los proyectos de investigación más recientes presentado en el país con relación al tema de mediciones ambientales es el Proyecto de Graduación "Modelo estructural calibrado y análisis dinámico del Edificio Central del Instituto Costarricense de Electricidad", elaborado por Cordero (2017). Una de las etapas del trabajo consistía en efectuar la modelación estructural del edificio, así como el análisis dinámico respectivo de la estructura. Con el

objetivo de garantizar la veracidad del modelo, se realizó la calibración de este a partir de las propiedades dinámicas reales del edificio, dichas propiedades se obtuvieron mediante pruebas de vibraciones ambientales. Finalmente, una vez calibrado el modelo, se efectuó un análisis de respuesta espectral con combinación modal para comparar las derivas obtenidas con respecto a los límites establecidos por el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CFIA, 2014).

Aunado a la investigación presentada por Cordero (2017), aún más reciente en Costa Rica se cuenta con el Trabajo Final de Graduación "Identificación de modos de torsión de tres edificios de concreto reforzado empleando la medición de vibraciones ambientales y el análisis espectral" de Godfrey (2018). El autor identificó frecuencias naturales asociadas a modos de torsión en estructuras de concreto reforzado de 3 distintos niveles de elevación, mediante la medición de las vibraciones ambientales a las que están sometidas dichas estructuras. Para llevar a cabo el análisis espectral, el autor empleó el método básico (BFD, por sus siglas en inglés) y el de descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD, por sus siglas en inglés).

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo general***

Determinar la rigidez elástica efectiva en dos viviendas unifamiliares de Mampostería de Concreto Integral a partir de medición de vibraciones ambientales.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

- a) Ejecutar mediciones de campo de las vibraciones producidas por ruido ambiental en dos viviendas unifamiliares de Mampostería de Concreto Integral (MCI) haciendo uso de acelerógrafos proporcionados por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica.
- b) Estimar los parámetros dinámicos experimentales de las viviendas mediante el procesamiento de las señales obtenidas de las mediciones de vibraciones recopiladas en campo.
- c) Elaborar un modelo analítico de las estructuras que permita la calibración del periodo fundamental asociado al primer modo traslacional.

## **1.3 Delimitación del problema**

### ***1.3.1 Alcance***

El proyecto de investigación abarcó el estudio de la rigidez elástica efectiva de dos viviendas unifamiliares de dos plantas con entrepiso rígido construida bajo el sistema de Mampostería de Concreto Integral (MCI).

Se seleccionaron dos viviendas a las cuales se pudo tener acceso a los planos estructurales, dado que este es un factor que tomó una relevancia significativa al momento de modelar las estructuras detalladamente, pues se requería conocer con precisión aspectos como el dimensionamiento de las viviendas, y las especificaciones técnicas a considerar en el proceso constructivo.

Con respecto al espacio geográfico, se analizaron viviendas ubicadas dentro del Valle Central, esto principalmente por razones de tiempo de traslado al sitio. Sin embargo, lo anterior no implica que el proyecto no pudo haberse ejecutado fuera del área mencionada.

La caracterización de los materiales de las estructuras mediante pruebas experimentales no se consideró dentro del alcance del proyecto. La definición de las propiedades elásticas de los materiales de las estructuras se llevó a cabo a partir de valores recomendados por la

normativa de diseño estructural vigente, y de investigaciones relacionadas con las características de la mampostería utilizada en la construcción en Costa Rica.

Las mediciones de las vibraciones ambientales tomadas en las edificaciones se realizaron haciendo uso de una serie de acelerógrafos debidamente calibrados. Se espera contar con una alta sincronización en tiempo entre los acelerógrafos a emplear, de tal forma que el nivel de precisión de las mediciones sea elevado.

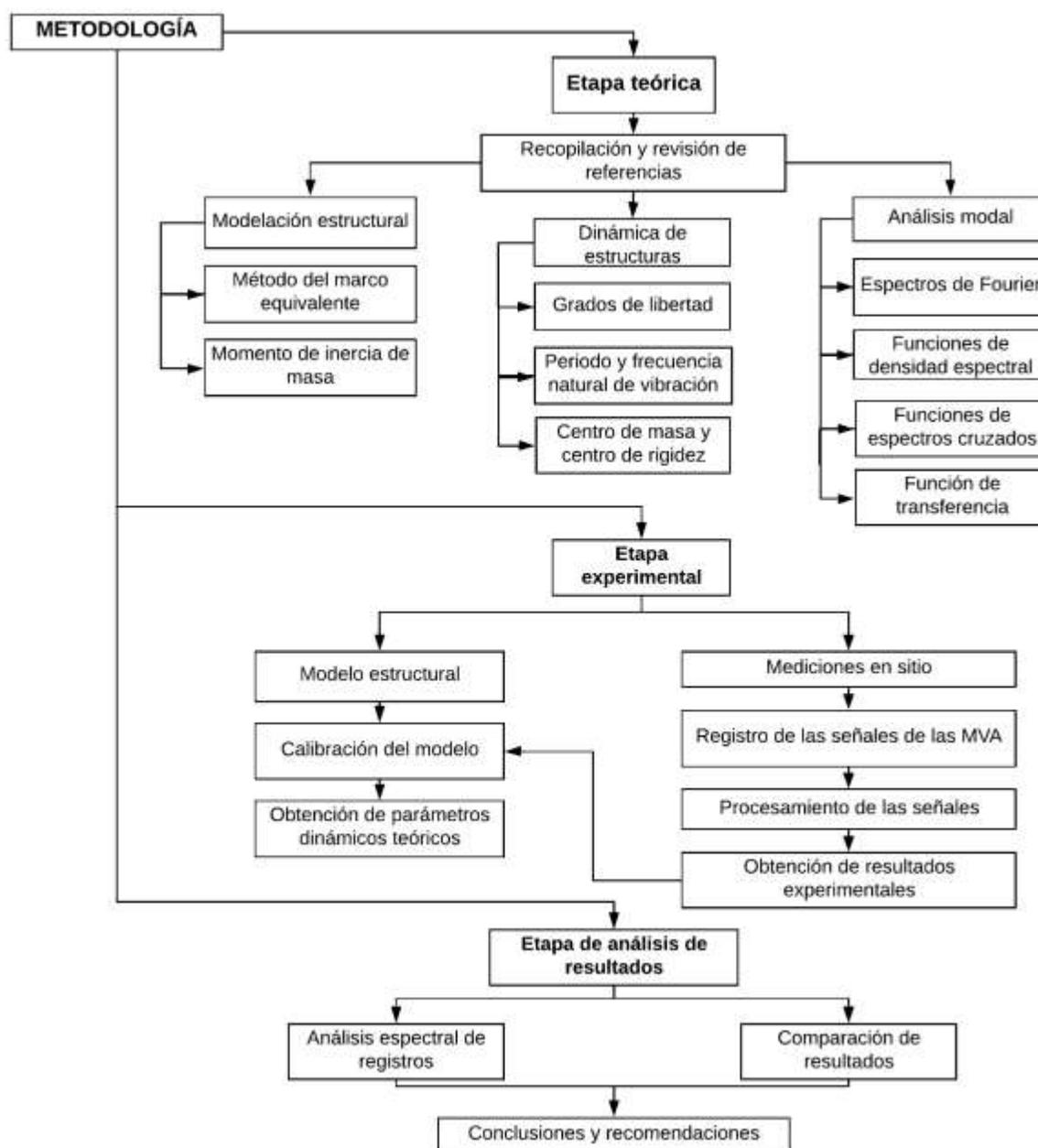
### ***1.3.2 Limitaciones***

Se enlistan a continuación las limitaciones que se podrían presentar en la realización del presente proyecto de investigación, y se plantean acciones que se podrían tomar para minimizar el impacto de estas en el trabajo.

- Ubicar una vivienda donde se puedan registrar las mediciones, debido a que se requiere que el(la) dueño(a) esté anuente a que se realicen las pruebas durante un tiempo suficiente sin que se presenten interrupciones, además, la estructura debe poseer las características mencionadas en el apartado de Alcance.  
Como medida para contrarrestar esta limitación se requiere comenzar la búsqueda de la vivienda con la mayor anticipación posible, de manera que en caso de que la tarea de encontrarla se torne complicada, se cuente con un tiempo prudencial para evitar atrasos considerables en la realización del proyecto.
- Falta de experiencia en el uso de programas computacionales a utilizar en el desarrollo del proyecto de investigación. Es importante investigar detenidamente cada uno de los softwares implicados en el proyecto, de manera que se logre un entendimiento claro de su funcionamiento, y de cómo interpretar los resultados que se obtengan de estos.
- Disponibilidad del personal capacitado en el uso de acelerógrafos, por lo que es necesario planificar efectivamente el día y la hora en que se realicen las mediciones en sitio.

## 1.4 Metodología

La metodología por seguir para la elaboración del proyecto de investigación está compuesta por tres etapas: la etapa teórica, la etapa experimental y la etapa de análisis; a su vez estas etapas se dividen en una serie de procesos. La metodología para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Metodología propuesta para el desarrollo del trabajo.

### **1.4.1 Etapa teórica**

La etapa teórica de la investigación consistió en la revisión bibliográfica de aspectos relacionados con el tema planteado en el proyecto. En esta fase se llevó a cabo la revisión de artículos técnicos, trabajos de graduación, libros y cualquier otro material físico o digital de carácter técnico que pudiera aportar conocimiento en el tema de interés. Entre los temas consultados en esta primera etapa se encontraron:

- Comportamiento dinámico de estructuras de mampostería.
- Vibraciones ambientales.
- Modelación de estructuras mediante programas computacionales de análisis estructural.

En lo que respecta a la modelación de la estructura, se consultó la investigación "*TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings*" de Lagomarsino (2013). En dicha investigación se aborda en detalle la modelación estructural mediante el método del marco equivalente, el cual consiste en modelar las paredes de la vivienda como un marco idealizado.

Con el fin de llevar a cabo la calibración del modelo estructural de la vivienda se investigó la documentación relacionada con valores experimentales del módulo de elasticidad de la mampostería costarricense. La principal referencia bibliográfica revisada en este caso fue "Propiedades a compresión de la mampostería de bloques de concreto", Navas (2007).

En relación con la teoría del análisis espectral, se consultaron las investigaciones "*Engineering applications of correlation and spectral analysis*" de Bendat y Piersol (1993), y "*Random Data. Analysis and Measurements Procedures*" de los mismos autores (2010). A partir de los estudios de Bendat y Piersol se plantearon las expresiones matemáticas que respaldan el análisis modal.

Con relación a los materiales que conforman el sistema constructivo de la vivienda, una de las tareas importantes a desarrollar en la fase teórica del presente proyecto consiste en la recopilación de información necesaria para definir las propiedades de estos. En específico, se requiere el valor de resistencia a compresión promedio de los materiales y su módulo de elasticidad, puesto que estos son valores requeridos en la etapa inicial de la modelación de la

vivienda. Para obtener la información mencionada se consultaron los planos constructivos de la vivienda, los cuales fueron facilitados por la empresa encargada de la construcción.

Finalmente, fue fundamental el acercamiento a los programas computacionales establecidos para el cumplimiento de los objetivos. Este proceso conllevó la investigación de manuales de usuario u otros materiales didácticos que permitieran adquirir el conocimiento suficiente para manipular de una manera adecuada los softwares empleados, los cuales serían, el programa computacional para modelar la estructura y el programa computacional para el tratamiento de las señales tomadas en sitio.

#### ***1.4.2 Etapa experimental***

Con respecto a la modelación estructural de la vivienda, se planteó utilizar el programa de cómputo SeismoStruct 2016 (SeismoSoft, 2017). Se optó por este programa por ser un software libre, y aunado a esto, posee una mayor cantidad de modelos constitutivos en los materiales y mayor flexibilidad para el modelado de los materiales estructurales. A partir de los planos constructivos de la vivienda se realizó el modelo tridimensional, en el cual se tomaron en cuenta todas las consideraciones técnicas y suposiciones necesarias para representar de la mejor manera las condiciones reales de la estructura.

Para la respectiva medición de las vibraciones ambientales que experimentaron las viviendas seleccionadas, se contó con la ayuda de personal experimentado en este tipo de pruebas y en el manejo de acelerógrafos digitales, quienes forman parte del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (LIS-UCR). Se dispuso de al menos una persona por acelerógrafo, esto con el fin de facilitar la manipulación y vigilancia de estos, así como de reducir el tiempo de aplicación de la prueba.

Entre los pasos considerados en esta etapa de medición, cabe mencionar que, se llevó a cabo la caracterización del equipo que se utilizó para registrar las aceleraciones, así como la descripción detallada del procedimiento seguido para efectuar las mediciones en campo, y la descripción del método para corregir los registros obtenidos de las mediciones.

El tratamiento y análisis de las mediciones de vibraciones ambientales tomadas en campo se llevó a cabo mediante los programas computacionales Matlab (MathWorks, 2018) y ARTeMIS Modal (Structural Vibration Solutions, 2018). En el caso de Matlab, de primera entrada se

utilizó para efectuar el acotado de las señales, la aplicación del factor de conversión de unidades, corrección por línea base y la eliminación de tendencia lineal. Adicionalmente, se empleó en el cálculo de espectros de Fourier y espectros cruzados. Respecto a ARTeMIS Modal, resultó de utilidad en la estimación de autoespectros, funciones de coherencia y funciones de transferencia.

A partir del análisis espectral de las señales fue posible visualizar la participación de cada una de las frecuencias en la señal de respuesta, por lo que se pueden identificar las frecuencias fundamentales. Una vez identificadas estas frecuencias, se logró obtener los valores de periodo fundamental de la estructura. El módulo de elasticidad de la mampostería es la variable empleada para realizar la calibración del modelo estructural.

### ***1.4.3 Etapa de análisis de resultados***

Como punto de partida en el análisis de los resultados se contó con las señales acelerográficas medidas en campo y previamente tratadas en la etapa anterior. La teoría que respalda el análisis de las señales se basó en el método básico en el dominio de la frecuencia, también conocido como el método de selección de picos.

El método para identificar las frecuencias naturales de la estructura se basó en el reconocimiento de "picos" en los espectros de densidad mediante inspección visual. Una frecuencia natural de vibración se manifiesta cuando ocurre la resonancia del sistema, gráficamente se presenta como un pico o una amplificación.

Esta etapa comprendió tanto el análisis de los resultados teóricos como de los resultados experimentales. El objetivo de la calibración del modelo es trascendental en el trabajo, puesto que al comparar los resultados teóricos y los resultados experimentales del periodo fundamental de la estructura se desea obtener una diferencia asociada entre dichas variables dinámicas razonablemente bajo.

La calibración del modelo consistió en modificar el módulo de elasticidad de la mampostería, el cual es una de las propiedades del material que afecta en mayor medida los resultados obtenidos. Lo anterior, hasta poder ajustar con el mínimo error posible el conjunto de modos de oscilación considerados en el análisis modal. Una vez calibrado el modelo estructural de la vivienda, fue posible determinar el grado de rigidez elástica que efectivamente presenta la

estructura. Si se identifica una estructura con niveles de agrietamiento considerables, es de esperarse que su rigidez efectiva se vea reducida, y viceversa, si las condiciones de la vivienda son óptimas los resultados mostraran un grado de rigidez mayor.

Finalmente, se presentó una serie de conclusiones y recomendaciones derivadas de los resultados obtenidos del trabajo de investigación.

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

En el presente apartado se establece una síntesis de los conceptos teóricos que sustentan el proyecto de investigación. En términos generales, se presenta una breve descripción del sistema constructivo del cual se compone la edificación en estudio, así como también del método empleado para realizar la modelación de la estructura. Además, se expone el tema de las vibraciones ambientales y sus aplicaciones en la ingeniería estructural. Finalmente, se aborda sobre la teoría del análisis modal, la cual es primordial para entender e identificar las propiedades dinámicas de la estructura.

### **2.1 Sistema constructivo**

La mampostería se define como un sistema constructivo que emplea unidades prefabricadas como bloques o ladrillos, ya sea para la construcción de elementos estructurales, así como no estructurales (Poveda, 2017). En Costa Rica se emplea principalmente en proyectos de vivienda y edificaciones de moderada altura.

Las dos tipologías definidas y aceptadas en el CSCR-10 (CFIA, 2014) son la integral y la confinada. En el caso de la mampostería integral, tanto el refuerzo horizontal como el refuerzo vertical quedan embebidos en los bloques, de manera que las paredes presentan un reforzamiento integral. La mampostería confinada por su parte toma este nombre debido a que los bloques son confinados en su perímetro por elementos de concreto reforzado.

Según el Ingeniero Álvaro Poveda, en Costa Rica el sistema de mampostería utilizado consiste en una combinación de los sistemas mencionados con anterioridad. En términos generales, los paños de bloques se refuerzan integralmente, sin embargo, estos a su vez son confinados por elementos como vigas medianeras, vigas corona, vigas de entepiso, columnas o mochetas de concreto armado (Poveda, 2017).

Las piezas de mampostería de concreto se encuentran de dos tipos, huecas y sólidas. El CSCR-10 (CFIA, 2014), clasifica la mampostería de unidades huecas de acuerdo con su calidad en: Clase A, B y C. La principal diferencia que radica entre estas clases es su resistencia promedio a la compresión, medida respecto al área neta de los bloques, donde para un bloque de clase A se permite un mínimo de  $120 \text{ kg/cm}^2$ , y para un bloque de clase C un mínimo de  $70 \text{ kg/cm}^2$ . Las pruebas de compresión de los bloques se realizan según la Norma ASTM C140-05 (ASTM International, 2017).

El mortero de pega de los bloques debe consistir en una mezcla de cemento, agregados y agua. Al igual que para las unidades huecas de mampostería, el mortero de pega se clasifica en tres clases; A, B y C, de acuerdo con la resistencia a la compresión mínima que alcance a los 28 días medida en cubos según la Norma ASTM C270-10 (ASTM International, 2010). Dicha resistencia debe ser como mínimo 175 kg/cm<sup>2</sup>, 126 kg/cm<sup>2</sup> y 53 kg/cm<sup>2</sup> para los morteros clase A, B y C respectivamente (CFIA, 2011).

Con respecto al concreto de relleno de las celdas de los bloques de mampostería, este consiste en una mezcla de cemento, agregados y agua. De acuerdo con el CSCR-10, se recomienda utilizar agregado grueso de 1,20 cm como tamaño máximo, además, con el fin de evitar problemas de segregación de los materiales que componen la mezcla de concreto, se debe trabajar con un revenimiento de la mezcla de 20 a 25 cm (CFIA, 2011). Las pruebas de compresión del concreto de relleno se efectúan según la Norma ASTM C1019-05 (ASTM International, 2005), y los valores mínimos recomendados por el CSCR-10 son 175 kg/cm<sup>2</sup>, 140 kg/cm<sup>2</sup> y 120 kg/cm<sup>2</sup> para los concretos de relleno clase A, B y C respectivamente.

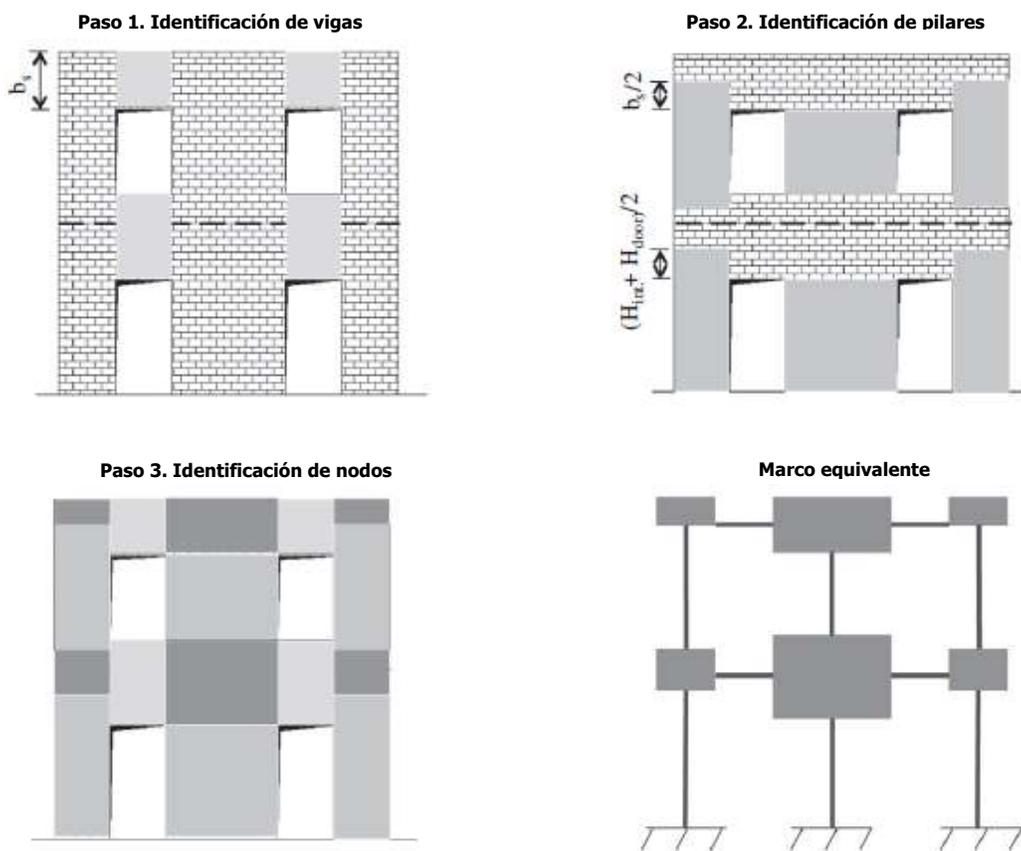
## **2.2 Modelación estructural**

### ***2.2.1 Método de modelación del marco equivalente***

El método de modelación "marco equivalente" o método de columna ancha considera las paredes como un marco idealizado, cuyos elementos deformables (donde se concentra la respuesta no lineal) se conectan con los nodos rígidos (sitios de la pared que no son sujetos a daños). Con relación a la respuesta de las paredes de mampostería con aberturas se pueden identificar dos componentes estructurales usualmente: *pilares y vigas*. Los pilares son los principales elementos que resisten las cargas verticales y laterales. Mientras que las vigas son elementos horizontales secundarios que acoplan la respuesta de los pilares adyacentes en el caso de cargas laterales (Lagomarsino et al, 2013).

El primer paso para modelar paredes de mampostería como un marco equivalente es la identificación de los componentes estructurales mencionados previamente, los pilares y las vigas. Una vez identificados estos elementos, se proceden a definir sus geometrías, donde para el caso de la altura de los pilares de mampostería se definen en función de la altura de las aberturas. En el caso de estructuras existentes, se debe considerar el patrón de fisuras preexistentes al momento de definir la geometría de los pilares y las vigas (Lagomarsino et al, 2013).

En la Figura 2 se observan los principales pasos del procedimiento para aplicar la teoría del marco equivalente en una pared de mampostería perforada regularmente (aberturas regulares). La longitud y la altura de las vigas se asumen igual a la distancia y ancho de las aberturas adyacentes, respectivamente. Los pilares se definen partiendo de la altura de las aberturas adyacentes, esto para el caso que las aberturas se encuentren alineadas, la altura de los pilares internos (los pilares mostrados en la Figura 2) se asume igual a la altura de las aberturas. Para el caso de los pilares externos se debe considerar el posible desarrollo de las grietas inclinadas en las esquinas de las aberturas. La geometría de los nodos rígidos (paso 3) se obtiene de manera directa de los elementos definidos previamente que están conectados a dichos nodos. La idealización de marco equivalente de la estructura se realiza separadamente para cada piso y cada pared. Cabe mencionar que la presencia de elementos estructurales, tales como dinteles, pueden afectar la altura efectiva de los pilares, en principio por una distribución irregular de las aberturas.

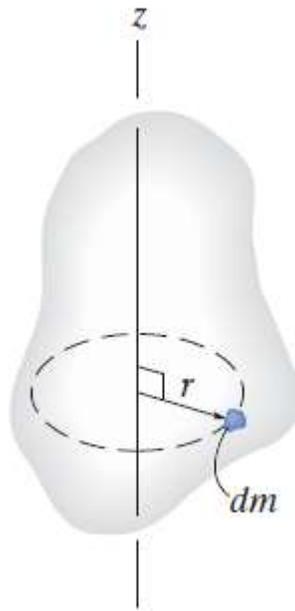


**Figura 2.** Idealización del marco equivalente en el caso de aberturas regularmente distribuidas.

Fuente: Lagomarsino, modificado por el autor, 2013

### 2.2.2 Momento de inercia de masa

Según Hibbeler (2010), el momento de inercia de masa de un cuerpo es una medida de la resistencia del cuerpo a la aceleración angular. En el caso del presente proyecto de investigación este parámetro es de interés puesto que la carga de entrepiso se consideró aplicada en el centro de gravedad de la estructura, de manera que resultó necesario estimar el momento de inercia de masa alrededor del eje que se encuentra perpendicular al plano, con el propósito de modelar adecuadamente el modo rotacional en la estructura.



**Figura 3.** Momento de inercia de masa de cuerpo rígido.

Fuente: Hibbeler, 2010

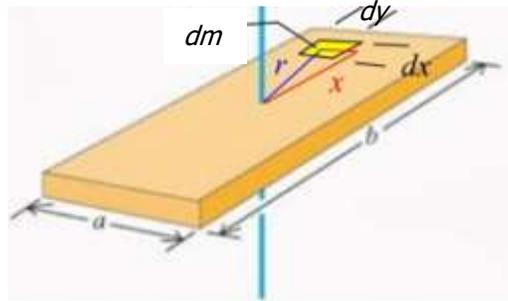
En general, se define el momento de inercia de masa del cuerpo (ver Figura 3) con respecto al eje z a partir de la siguiente expresión:

$$I = \int r^2 dm \quad [Ec.1]$$

La estructura en estudio presenta un entrepiso con geometría rectangular, para este caso en específico, el momento de inercia de masa alrededor del eje perpendicular al plano x-y se estima como se muestra a continuación:

$$I_{zz} = \frac{M}{12}(a^2 + b^2) \quad [Ec.2]$$

Donde,  $M$  es la masa distribuida en el plano  $x$ - $y$ ,  $a$  es el lado corto y  $b$  el lado largo de la planta de entrepiso, como se observa en la Figura 4.



**Figura 4.** Configuración de momento de inercia de masa para un rectángulo.

Fuente: Hibbeler, 2010

### 2.3 Mediciones de vibraciones ambientales

El origen de las vibraciones es variado, por lo tanto, se pueden agrupar según diferentes características. Se cuenta con las vibraciones generadas por equipo o maquinaria, por ejemplo, bombas de agua, lavadoras o aires acondicionados (Esquivel, 2012). Adicionalmente, se tienen aquellas vibraciones originadas directamente por las actividades de los usuarios de la estructura. Por último, existen las vibraciones producto de actividades del ambiente, entre ellas, el paso de vehículos en las cercanías de la estructura, el viento y el ruido en general.

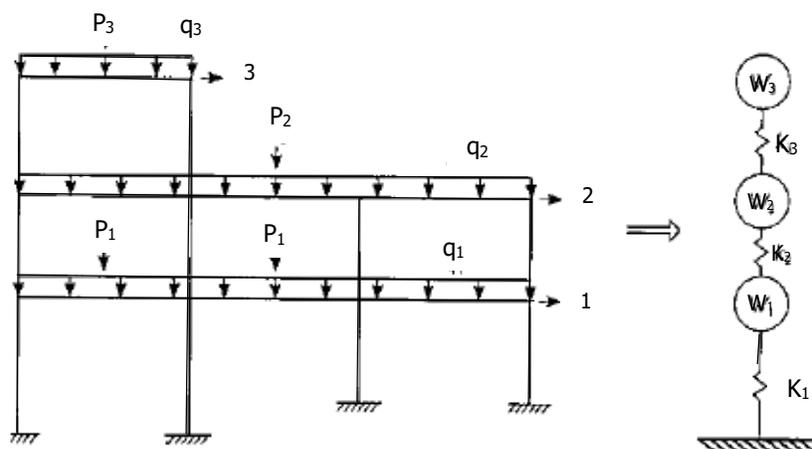
Las MVA son una herramienta útil para tareas como la verificación de modelos matemáticos empleados para el diseño estructural, el monitoreo de la "salud" de una estructura, verificar las intervenciones estructurales, detección de daños e inspecciones basadas en las vibraciones (Esquivel & Schmidt, 2016). El análisis de los datos obtenidos de las MVA permite determinar parámetros dinámicos en el rango elástico, tal es el caso de los periodos naturales de la estructura y el amortiguamiento modal.

### 2.4 Generalidades en la dinámica de estructuras

#### 2.4.1 Grados de libertad de una estructura

Según Chopra (2014), se entiende grados de libertad (GDL) como el número de desplazamientos independientes necesario para definir las posiciones desplazadas de todas las masas en relación con su posición original. Un sistema estructural de varios grados de

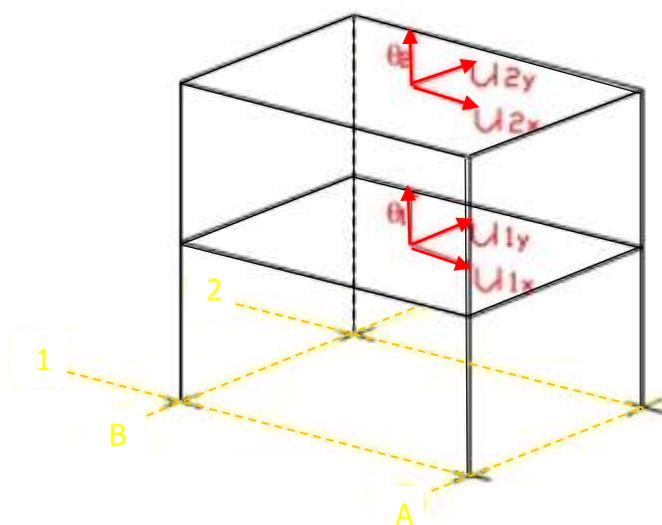
libertad se puede idealizar como un conjunto de masas concentradas unidas por elementos que proporcionan rigidez al sistema.



**Figura 5.** Simplificación de un sistema estructural de varios grados de libertad.

Fuente: Gómez, modificado por el autor, 2007

Es usual considerar tres posibles grados de libertad por planta en la modelación de estructuras. Dos de estos grados están asociados a movimientos de traslación, por su parte el tercero corresponde a un movimiento de rotación. La consideración únicamente es válida siempre y cuando el entrepiso de la edificación clasifique como un diafragma rígido.

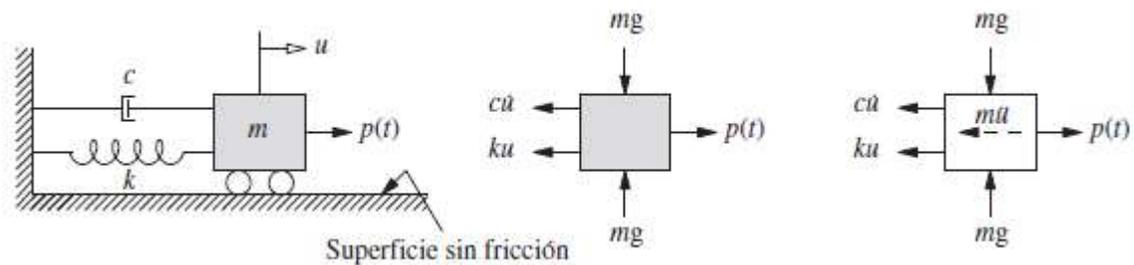


**Figura 6.** Idealización de una estructura con diafragma rígido a nivel de entrepiso.

Fuente: Adaptado de Google imágenes, modificado por el autor, 2018

### 2.4.2 Período y frecuencia natural de vibración

El *período natural de vibración* de un sistema ( $T_n$ ) se define como el tiempo necesario para que el sistema no amortiguado ( $c=0$ ) complete un ciclo de vibración libre, sus unidades son los segundos (Chopra, 2014). Una manera sencilla de modelar este comportamiento es mediante un sistema masa-resorte. A continuación, se presenta la ecuación diferencial que rige este tipo de sistemas, se establece  $p(t)=0$  y se realiza equilibrio de fuerzas en la dirección horizontal (ver Figura 7):



**Figura 7.** Sistema masa-resorte-amortiguador.

Fuente: Chopra, 2014

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad [Ec.3]$$

Resolviendo la ecuación anterior se obtiene el período natural de vibración del sistema, parámetro que depende exclusivamente de la masa ( $m$ ) y la rigidez ( $k$ ):

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad [Ec.4]$$

Un sistema efectúa  $1/T_n$  ciclos en 1 segundo, a esto se le conoce como la *frecuencia natural de vibración*, y se define mediante la siguiente expresión:

$$f_n = \frac{1}{T_n} \quad [Ec.5]$$

El calificativo *natural* empleado tanto para el período como para la frecuencia realiza el hecho que estas son propiedades naturales del sistema, esto cuando se le permite vibrar libremente, es decir, sin ningún tipo de excitación externa.

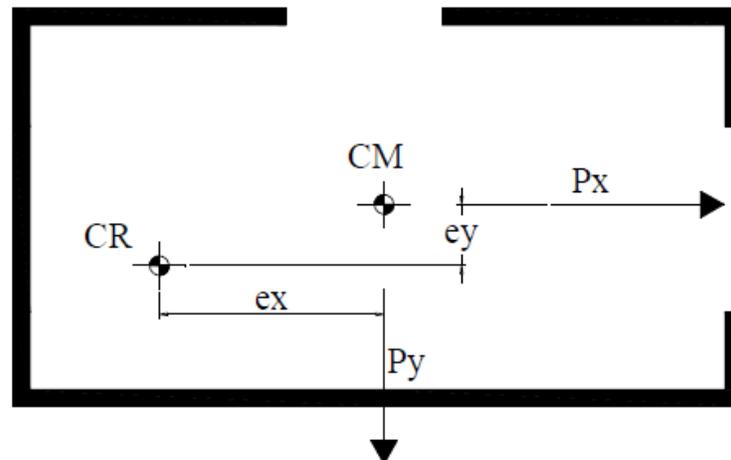
El período fundamental de oscilación es el parámetro que determina si el efecto de una carga externa será estático o dinámico sobre una estructura (Tejada, 2011). Si la duración de la aplicación de la carga es menor que el período fundamental se dice entonces que la

estructura presentará una respuesta dinámica, en caso contrario, la estructura exhibirá una respuesta estática.

### 2.4.3 Centro de masa y centro de rigidez

Con el objetivo de realizar un diseño estructural adecuado es importante conocer los efectos que genera la torsión, esto para lograr satisfacer los requerimientos de esfuerzos y rigidez de los elementos sismorresistentes.

Según Mendoza (2007), los efectos torsionales se consideran como la aplicación de fuerzas laterales equivalentes a una distancia  $e_d$  a partir del centro de rigidez. La excentricidad  $e_d$  depende directamente de las rigideces de los elementos estructurales, de la posición del centro de masa y de las cargas aplicadas (ver Figura 8).



**Figura 8.** Efectos torsionales producto de las fuerzas laterales.

Fuente: Poveda, 2017

#### 2.4.3.1 Centro de masa

El centro de masa de una estructura, CM, se determina como el centro de gravedad de las cargas verticales. Si las cargas verticales presentan una distribución uniforme, el CM coincide con el centro geométrico de la planta de la estructura. Las coordenadas del CM se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$X_{CM} = \frac{\sum P_i x_i}{\sum P_i} \quad [Ec. 6]$$

$$Y_{CM} = \frac{\sum P_i y_i}{\sum P_i} \quad [Ec. 7]$$

Donde,  $P_i$  se asocia con la masa de los elementos,  $x_i$  y  $y_i$  las coordenadas del centro de masa de estos elementos.

#### 2.4.3.2 Centro de rigidez

El centro de rigidez, CR, es el punto donde la resultante de las fuerzas laterales actúa sin ejercer rotación de la planta. El par ordenado que conforman el centro de rigidez se determinan de la siguiente manera:

$$X_{CR} = \frac{\sum x_i k_{y,i}}{\sum k_{y,i}} \quad [Ec. 8]$$

$$Y_{CR} = \frac{\sum y_i k_{x,i}}{\sum k_{x,i}} \quad [Ec. 9]$$

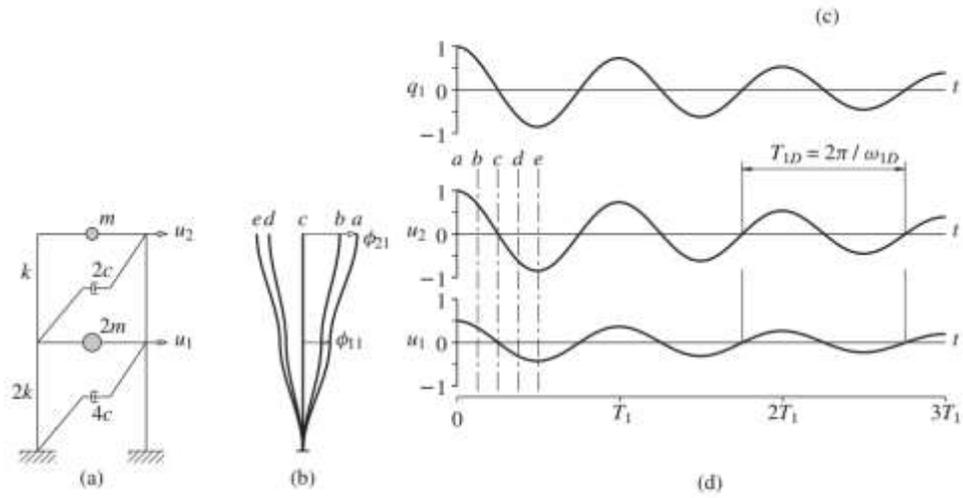
Donde,  $k_{y,i}$  y  $k_{x,i}$  son la rigidez del elemento  $i$  en las direcciones  $y$  y  $x$  respectivamente.

### 2.5 Análisis modal

Cualquier estructura se puede aproximar a un péndulo invertido, que está sometido a una vibración en la base. El péndulo describe un movimiento oscilatorio que de manera progresiva experimenta un amortiguamiento hasta el punto de desaparecer el movimiento, llegando nuevamente a la posición de equilibrio original (Chopra, 2014). Como es de esperarse, no todas las edificaciones responden igual ante una vibración en su base. Incluso, cada estructura posee una frecuencia propia, llamada también frecuencia natural; esta depende de la rigidez y de la altura en la que oscile la estructura.

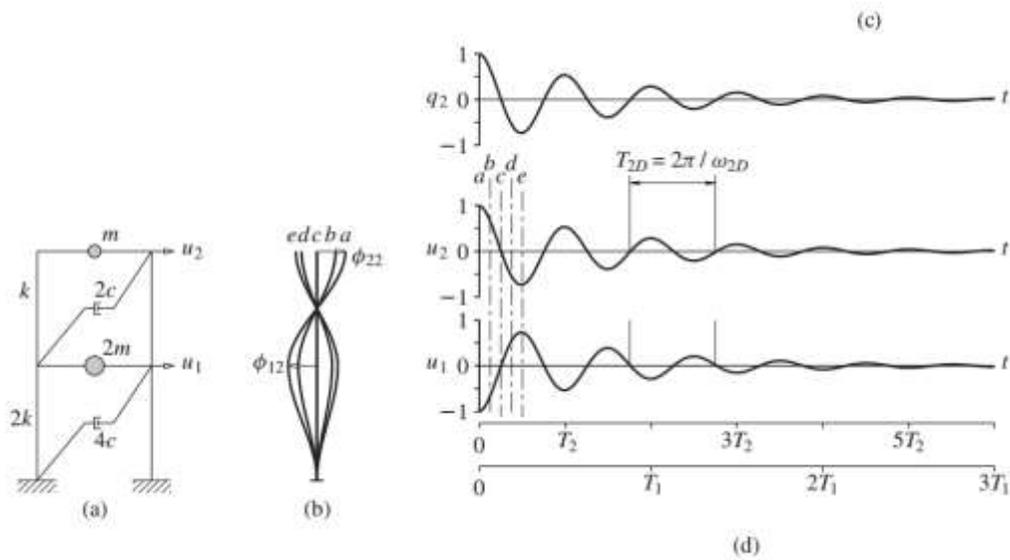
Para un sistema de varios grados de libertad clásicamente amortiguado que está sometido a una vibración libre en su modo natural  $n$ , la amplitud de desplazamiento en cualquier grado de libertad disminuye con cada ciclo de vibración. Este decaimiento depende del porcentaje de decaimiento en ese modo, de una forma similar a los sistemas de un grado de libertad (Chopra, 2014).

El porcentaje de amortiguamiento en un modo natural de un sistema de varios grados de libertad se puede determinar mediante una prueba de vibración libre siguiendo el mismo procedimiento que para los sistemas de un grado de libertad. En las siguientes figuras se muestran ejemplos de sistemas clásicamente amortiguados, en el primer modo de vibración natural, y en el segundo modo de vibración natural.



**Figura 9.** Vibración libre de un sistema clásicamente amortiguado en el primer modo de vibración natural.

Fuente: Chopra, 2014

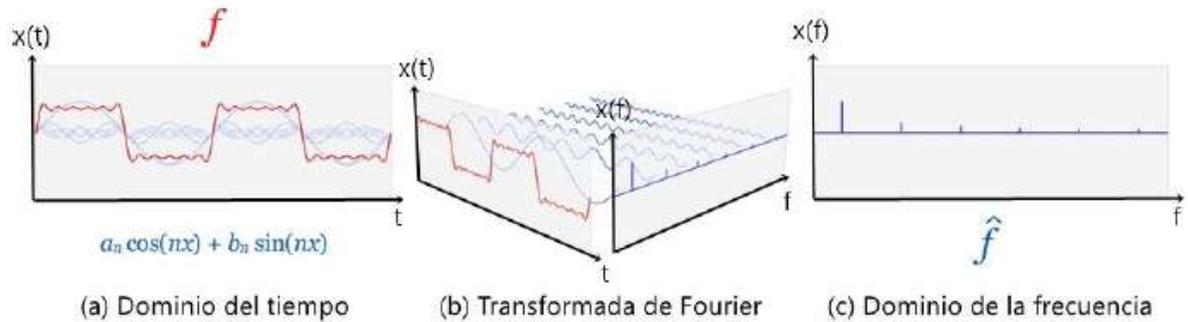


**Figura 10.** Vibración libre de un sistema clásicamente amortiguado en el segundo modo de vibración natural.

Fuente: Chopra, 2014

### 2.5.1 Espectros de Fourier

La Transformada de Fourier consiste en una expresión matemática que permite transformar una función en el dominio temporal a una función en el dominio frecuencial (Figura 11).



**Figura 11.** Aplicación de la Transformada de Fourier.

Fuente: Adaptado de Wikipedia, 2018

La Transformada de Fourier de una función  $x(t)$  está dada por (Bendat & Piersol, 2010):

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad [Ec. 10]$$

No es posible medir en campo ningún proceso desde  $-\infty$  hasta  $+\infty$ , en su lugar, se define un intervalo finito de tiempo  $T$ , y de esta manera se obtiene la Transformada Finita de Fourier (Henaó, 2013). Dicha transformada se estima mediante la siguiente expresión (Bendat & Piersol, 1993):

$$S_x(f, T) = \int_0^T x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad [Ec. 11]$$

A nivel computacional se emplea un algoritmo que reduce sustancialmente la cantidad de operaciones a efectuar en el cálculo de la Transformada de Fourier, el cual se denomina Transformada Rápida de Fourier (FFT) (Cooley & Tukey, 1965).

### 2.5.2 Funciones de densidad espectral

Tal como lo indica Henaó (2013), las funciones de densidad espectral son la representación en el dominio de la frecuencia de las funciones de correlación, es decir, su transformada de Fourier (Henaó, 2013). Trata de una función matemática que indica cómo se distribuye la energía de una señal sobre las distintas frecuencias que la conforman.

### **2.5.3 Función de autocorrelación**

La función de autocorrelación es el promedio respecto a la totalidad del tiempo de una señal consigo misma desplazada un tiempo  $\tau$  (Bendat & Piersol). La autocorrelación se define mediante la siguiente ecuación:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad [Ec. 12]$$

### **2.5.4 Funciones de densidad autoespectral**

La función de densidad autoespectral o autoespectro se obtiene a partir de la transformada de Fourier de la función de autocorrelación de un registro de tiempo  $x(t)$  (Bendat & Piersol, 1993), y se calcula mediante la expresión:

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad [Ec. 12]$$

Otra alternativa para obtener los autoespectros es mediante el producto del espectro de Fourier de una señal con su conjugada (Muriá Vila, 2007):

$$S_{xx}(f) = S_x(f) \cdot S_x^*(f) \quad [Ec. 13]$$

### **2.5.5 Funciones de espectros cruzados**

La potencia espectral cruzada consiste en la transformada de Fourier de la función de correlación cruzada de un registro de tiempo  $x(t)$  (Bendat & Piersol, 1993), y se estima como se muestra a continuación:

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad [Ec. 14]$$

Similar al caso de los autoespectros, los espectros cruzados también se pueden obtener mediante el producto del espectro de Fourier de una señal con su conjugada (Muriá Vila, 2007):

$$S_{xy}(f) = S_y(f) \cdot S_x^*(f) \quad [Ec. 15]$$

### 2.5.6 Funciones de potencia unilaterales

Las funciones  $S_{xx}(f)$ ,  $S_{xy}(f)$  y  $S_{yy}(f)$  se encuentran definidas en todo el rango de los valores reales, son funciones bilaterales. Según Bendat y Piersol (2010), en la práctica es preferible trabajar con espectros definidos únicamente sobre frecuencias no negativas. Las funciones con esta característica se denominan funciones unilaterales,  $G_{xx}(f)$ ,  $G_{xy}(f)$  y  $G_{yy}(f)$ , y están dadas por la siguiente expresión:

$$G_{xx}(f) = \begin{cases} 2S_{xx}(f); & f > 0 \\ S_{xx}(f); & f = 0 \\ 0; & f < 0 \end{cases} \quad [Ec. 16]$$

$$G_{xy}(f) = \begin{cases} 2S_{xy}(f); & f > 0 \\ S_{xy}(f); & f = 0 \\ 0; & f < 0 \end{cases} \quad [Ec. 17]$$

$$G_{yy}(f) = \begin{cases} 2S_{yy}(f); & f > 0 \\ S_{yy}(f); & f = 0 \\ 0; & f < 0 \end{cases} \quad [Ec. 18]$$

### 2.5.7 Función de transferencia

De acuerdo con Bendat y Piersol (1993), la función de transferencia, también conocida como función de respuesta en frecuencia, es la que describe las propiedades dinámicas de un sistema lineal. La función de transferencia en términos matemáticos está asociada con la relación entre los espectros de Fourier de la entrada y salida de un sistema, en el dominio de las frecuencias.

$$H(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} \quad [Ec. 19]$$

Dado que con la expresión anterior se corre el riesgo que existan valores donde  $S_x(f)$  sea cero para una frecuencia en particular, en la práctica se emplean maneras alternativas de estimar  $H(f)$ , esto a partir de cocientes espectrales entre autoespectros y espectros cruzados. Es posible establecer ecuaciones base para la determinación de las características de la función de respuesta en el dominio de la frecuencia de un sistema mediante pruebas de mediciones aleatorias (Ewins, 2000).

$$H_1(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)} \quad [Ec. 20]$$

$$H_2(f) = \frac{G_{yy}(f)}{G_{yx}(f)} \quad [Ec. 21]$$

### **2.5.7 Función de coherencia**

La función de coherencia permite analizar la consistencia que existe entre las señales de entrada y las señales de salida, dicho de otra manera, qué tanto la señal de salida es producto únicamente de la señal de entrada o si se da la presencia de otro tipo de señales (ruido) que afectan la señal de salida. La función de coherencia oscila entre un valor de 0 y 1, donde 0 indica que no existe coherencia entre las señales y 1 implica que la coherencia es perfecta. La función de coherencia está definida por la siguiente expresión:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} = \frac{(G_{xy}(f))^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad [Ec. 19]$$

Si el valor de la función se encuentra entre 0 y 1, puede deberse a una o más de las siguientes razones (Bendat & Piersol, 1993):

- Ruido extraño presente en las mediciones.
- Errores de resolución en las estimaciones espectrales.
- El sistema que relaciona  $y(t)$  con  $x(t)$  no es lineal.
- La salida  $y(t)$  es debida a otras entradas además de  $x(t)$ .

## **2.6 Métodos de análisis modal**

Existen tres métodos para el análisis de señales en el dominio de la frecuencia que se basan en la teoría del análisis modal: el método básico en el dominio de la frecuencia (BFD, por sus siglas en inglés), el método de descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD, por sus siglas en inglés), y el método de descomposición en el dominio de la frecuencia mejorado (EFDD, por sus siglas en inglés). Se describen a continuación los primeros dos.

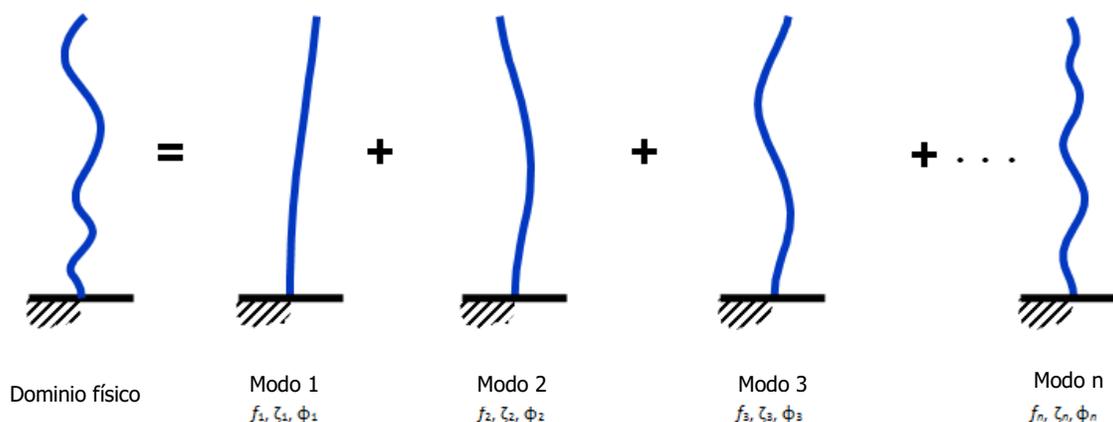
### **2.6.1 Método básico en el dominio de la frecuencia**

De acuerdo con Bendat y Piersol (1993), el método consiste en el uso de las funciones de densidad espectral con el fin de identificar las frecuencias y modos naturales de vibración de una estructura. Los parámetros dinámicos son identificados a partir de la selección de picos en las funciones de densidad espectral.

La identificación de los parámetros dinámicos se realiza mediante el cálculo de los autoespectros y de los espectros cruzados con respecto a un acelerógrafo de referencia (Rainieri, 2014). Las frecuencias naturales se identifican como aquellas en las que se presenta la amplificación del sistema en los espectros de amplitud.

### 2.6.2 Método de descomposición en el dominio de la frecuencia

La técnica de descomposición en el dominio de la frecuencia pretende efectuar una descomposición aproximada de la respuesta del sistema en un conjunto de sistemas independientes de un solo grado de libertad, uno para cada modo. La teoría es descrita en el trabajo realizado por Brincker, Zhang y Andersen (2000). El método consiste en descomponer los valores singulares de cada una de las matrices de densidad espectral estimadas para obtener los modos y las frecuencias naturales de vibración. Como se presenta en la siguiente figura, una estructura posee gran cantidad de modos de vibración y a medida que los modos aumentan en frecuencia resulta en formas modales más complejas, y se requiere más energía para excitar estos modos en comparación con los modos de baja frecuencia más simples.



**Figura 12.** Representación gráfica de la teoría de análisis modal.

Fuente: ARTeMIS Modal Pro, 2018

De acuerdo con los autores, los resultados que se obtienen de este método son exactos en el caso que la carga sea ruido blanco, la estructura esté ligeramente amortiguada y las formas modales de modos cercanos sean ortogonales geoméricamente. Si estas condiciones no se satisfacen el método FDD brinda resultados aproximados, no obstante, estos resultados son más precisos que los resultados estimados a partir de métodos clásicos.

## CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1 Modelación de la estructura

El programa computacional SeismoStruct consiste en una herramienta de análisis y diseño estructural capaz de predecir el comportamiento de marcos espaciados bajo cargas estáticas o dinámicas, considerando geometrías no lineales y materiales inelásticos. Para fines del presente trabajo de investigación, se emplea SeismoStruct 2016 para llevar a cabo la modelación estructural de la vivienda en estudio.

A continuación, se describe la geometría y las propiedades de desempeño de las secciones que componen la vivienda seleccionada, se presta especial atención a aquellas características de importancia dentro del marco del presente trabajo. Se definen las dimensiones de las secciones, las propiedades de los materiales estructurales empleados en la vivienda (mampostería, concreto), cargas impuestas sobre la estructura.

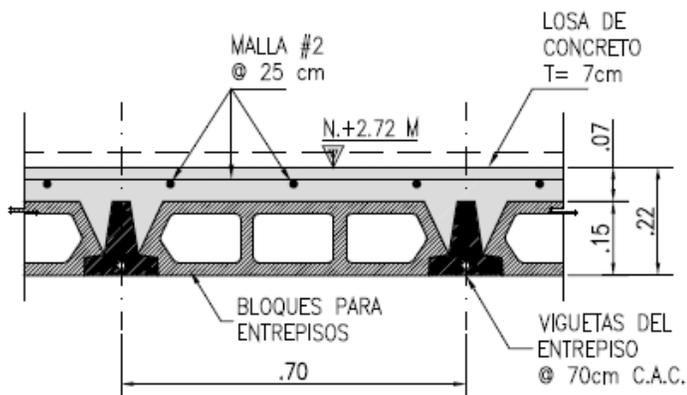
#### 3.1.1 Generalidades del sistema estructural

El entrepiso de la vivienda se considera como un diafragma infinitamente rígido, puesto que cumple con todas las condiciones que define el CSCR-10, en su apartado 4.6 (CFIA, 2014):

- a) Relación largo/ancho menor que 3.
- b) Discontinuidades en el diafragma con área menor que el 50% del área bruta de la planta.
- c) Dimensión máxima en planta de la estructura menor o igual a 50 m.
- d) Sobrelosa de concreto con un espesor mínimo de 6 cm (Figura 6).

**Cuadro 1.** Generalidades del sistema estructural.

<b>Revisión de diafragma rígido en entrepiso</b>	
Largo (m)	12,52
Ancho (m)	7,05
Relación L/b	1,78
Área ducto de escaleras (m <sup>2</sup> )	4,65
Área bruta de la planta (m <sup>2</sup> )	88,27
Espesor de sobrelosa (cm)	7,00



**Figura 13.** Detalle de entepiso de la vivienda.

Fuente: Planos estructurales de la edificación, modificado por Vásquez, 2018

Con respecto a la clasificación de la vivienda según su regularidad, se analiza tanto la regularidad en altura como la regularidad en planta. Se considera que la edificación presenta regularidad en altura dado que satisface los siguientes requisitos definidos en el CSCR-2010, apartado 4.3.1 (CFIA, 2014):

- i) Continuidad de los elementos verticales del sistema sismorresistente desde la cimentación hasta el nivel superior de cada elemento.
- ii) Diafragma rígido en todos los niveles salvo el nivel de techo.
- iii) La capacidad en cortante de cada nivel es superior que la capacidad en cortante del nivel superior inmediato.

La vivienda presenta regularidad en planta debido a que cumple las siguientes condiciones:

- i) La excentricidad en cada una de las direcciones ortogonales x, y no excede en más del 5% la dimensión en planta en la respectiva dirección. Los resultados que corroboran esta condición se muestran en el Apéndice A.
- ii) La estructura ofrece resistencia en al menos dos ejes diferentes en cada dirección ortogonal.

### 3.1.2 Características de las viviendas

En el Cuadro 2 se muestra un resumen de las principales características generales y estructurales de las viviendas ubicadas en el proyecto Avenir Condominio en Santo Domingo de Heredia.

**Cuadro 2.** Características generales y estructurales de las viviendas.

<b>Vivienda tipo AC-2C</b>	
Área	160,90 m <sup>2</sup>
Tipo de uso	Casa de habitación
Año de construcción	2017-2018
Pisos	2
Tipo de regularidad	Planta: regular
	Elevación: regular
Sistema estructural	Tipo muro: muros de mampostería integral
Sistema de entrepiso	EUROBAU: viguetas pretensadas
Sistema de cimentación	Placas aisladas y placas corridas

Como se describe en el cuadro anterior, la edificación consiste en una vivienda de dos niveles, constituida por un sistema estructural tipo muro y transmite sus cargas a la superficie soportante mediante un sistema de placas aisladas y placas corridas. En la Figura 14 se presenta una vista general del frente de la edificación.

Como se puede observar de la figura, existe una interacción entre la vivienda seleccionada para efectuar las mediciones y las estructuras aledañas a esta. Dicha interacción se corroboró en campo y se consideró que el contacto entre los muros de colindancia de las viviendas era prácticamente inminente.



**Figura 14.** Vista frontal de la vivienda tipo AC-2C ubicada en Avenir Condominio.

La edificación se encuentra en el Proyecto Avenir Condominio, el cual es desarrollado por la empresa constructora Vivicon. Avenir Condominio se ubica a 600 metros oeste del Parque Central de Santo Domingo de Heredia, en la Figura 15 se observa el área aproximada que abarca el proyecto, mientras que en la Figura 16 se delimita en específico las viviendas donde se ejecutaron las pruebas. En el caso de la vivienda 2, cabe mencionar que esta no se aprecia en la figura debido a que la herramienta computacional empleada, Google Earth Pro2018, no se encuentra actualizada respecto al avance actual de la obra.



**Figura 15.** Ubicación espacial del Proyecto Avenir Condominio, Santo Domingo de Heredia.  
Fuente: Google Earth Pro, modificado por el autor, 2018

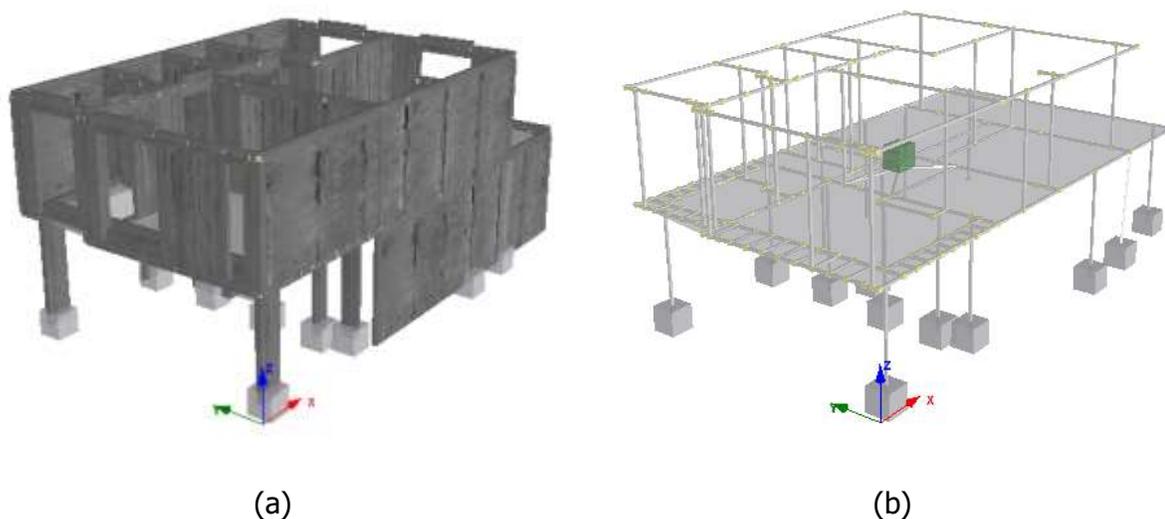


**Figura 16.** Ubicación espacial de las edificaciones dentro del Proyecto Avenir Condominio.  
Fuente: Google Earth Pro, modificado por el autor, 2018

### 3.1.3 Modelación de la estructura

A partir de los planos constructivos de la vivienda en estudio, los cuales fueron facilitados por la empresa constructora Vivicon, se lleva a cabo la modelación de la estructura. A diferencia de programas de modelado estructural como SAP o ETABS donde la definición de los ejes de la estructura se realiza mediante una grilla, en el caso de SeismoStruct se definen los nodos propios de cada elemento.

Con la finalidad de efectuar la modelación de un muro de mampostería, se indican los nodos ubicándolos en el centroide de dicho muro, tanto en la base del muro como en su punto más alto. Esta técnica de modelación se basa en el método del marco equivalente, el cual consiste en concentrar las propiedades de los muros de la vivienda en columnas ficticias ubicadas en el centroide de los muros. Las vigas que se encuentran tanto debajo como encima de los muros se modelan infinitamente rígidas, dado que se debe corroborar la compatibilidad de deformaciones entre los elementos. Las vigas que se ubican sobre buques, ya sea de ventanas o puertas, se modelan como vigas simples de flexión. En la Figura 17(a) se presenta una vista general de la estructura donde se identifican sus muros y vigas, en cuanto a la Figura 17(b), se muestra la estructura una vez aplicado el método del marco equivalente.



**Figura 17.** (a) Vista en perspectiva de la estructura. (b) Modelación de la estructura aplicando la teoría del marco equivalente.

### **3.1.4 Propiedades de los materiales**

En esta etapa de la modelación se definen los materiales que forman parte del sistema sismorresistente de la vivienda. La estructura del inmueble consiste principalmente de muros de mampostería integral, elementos de concreto reforzado como columnas y vigas a flexión (buques de puertas y ventanas), y vigas de concreto modeladas como infinitamente rígidas, esto último para el caso de aquellas vigas que se encuentran debajo o sobre muros de mampostería.

**Cuadro 3.** Propiedades de desempeño de los materiales que componen la estructura.

<b>Propiedades</b>	<b>Mampostería</b>	<b>Concreto normal</b>	<b>Concreto (viga rígida)</b>
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	18,80	24,00	24,00
Módulo de elasticidad (kPa)	7,36E+06	2,13E+07	1,72E+15
Esfuerzo de compresión (kPa)	9806,65	20593,97	28000,00
Esfuerzo de tensión (kPa)	2200,00	2200,00	2200,00

Las secciones contempladas en el modelo estructural, en términos generales, consisten en vigas flexibles, vigas infinitamente rígidas, columnas, y muros de mampostería integral de concreto. Con respecto al sistema de entrepiso y la estructura de techo de la vivienda, ambas secciones se presentan en el modelo como cargas aplicadas. Respecto a las vigas infinitamente rígidas, para obtener una rigidez "infinita" en los elementos, se emplea la inercia del muro con mayor rigidez por un valor de  $1 \times 10^4$ .

### **3.1.5 Cargas aplicadas en la estructura**

#### *3.1.5.1 Sistema de entrepiso*

Por tratarse el entrepiso de un diafragma rígido y para efectos prácticos de la modelación de la estructura, se consideró aplicar las cargas propias del entrepiso en el centro de masa de la vivienda. En el Cuadro 4 se muestran las cargas contempladas en el entrepiso, las cuales se obtuvieron a partir de los planos suministrados por la empresa constructora encargada del proyecto.

**Cuadro 4.** Carga permanente y carga temporal del entrepiso.

<b>Carga de entrepiso</b>	<b>Peso (kg/m<sup>2</sup>)</b>
Cerámica	50
Acabado de cielos	15
Instalaciones electromecánicas	10
Divisiones livianas	80
Peso propio del entrepiso	310
<b>Total</b>	<b>465</b>

Seguidamente, se presenta la masa concentrada aplicada en el centro de masa de la estructura en el plano x-y. Para este fin fue necesario estimar el área total del entrepiso, dicha área se obtuvo mediante los planos estructurales de la vivienda.

$$W = \frac{w \cdot A_{entrepiso}}{1000} \quad [Ec. 20]$$

$$W = \frac{495 \cdot 51,23}{1000} = 25,36 \text{ ton}$$

La masa rotacional (eje z) se calculó a partir de la expresión que se muestra a continuación:

$$W_{zz} = \frac{W}{12} (a^2 + b^2) \quad [Ec. 21]$$

Donde,

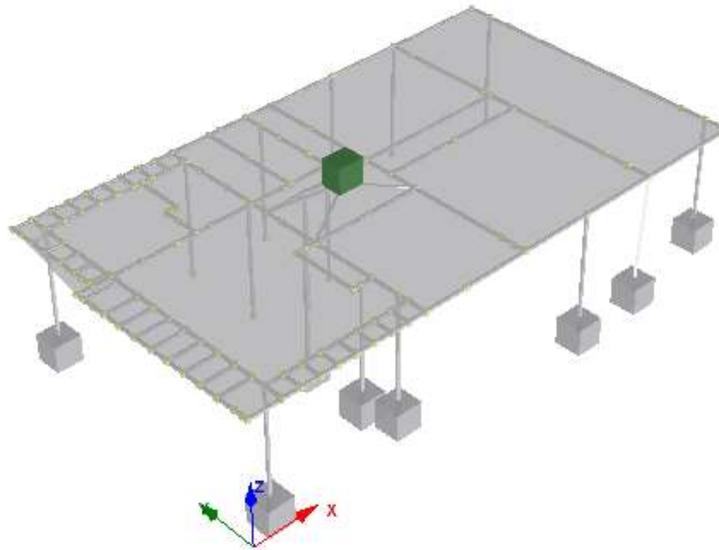
a = Lado largo de la planta de entrepiso

b = Lado corto de la planta de entrepiso

$$W_{zz} = \frac{25,36}{12} (12,52^2 + 7,05^2)$$

$$W_{zz} = 436,30 \text{ ton} \cdot \text{m}^2$$

En la Figura 18 se muestra la configuración de la planta de entrepiso con la respectiva carga del entrepiso aplicada en el centro de masa de la estructura. Es importante indicar que la simplificación de aplicar las cargas de entrepiso como una carga puntual en el centro de masa es posible debido a que el entrepiso funciona como un diafragma rígido.



**Figura 18.** Carga de entrepiso aplicada en el centro de masa de la estructura.

### 3.1.5.2 Sistema de techo

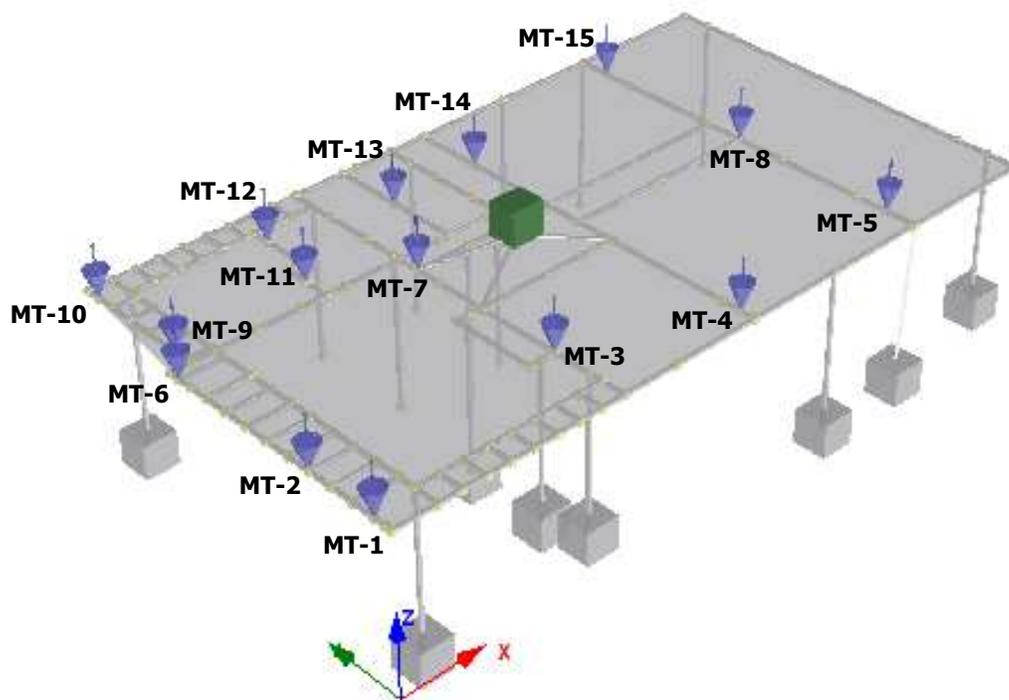
La estructura de techo se define como un diafragma flexible, por lo tanto, las cargas producto del techo se distribuyen en la estructura por área tributaria. Con respecto a la presentación de las cargas de techo en el modelo, estas se distribuyen directamente en los nodos ubicados en el centro de masa de las paredes involucradas.

En el Cuadro 5 se presenta el resumen de las cargas aplicadas en cada uno de los nodos. Debido a que el cálculo se realiza por área tributaria, se muestra en el cuadro el ancho efectivo asociado a cada uno de los muros del segundo nivel de la vivienda, la carga permanente ( $40 \text{ kg/m}^2$ ) y la carga temporal ( $40 \text{ kg/m}^2$ ) asociada a la estructura de techo, y la longitud equivalente de los muros. El valor de las cargas se obtuvo de los planos estructurales de la edificación.

**Cuadro 5.** Carga permanente y carga temporal del entrepiso.

<b>Elemento</b>	<b>Befectivo (m)</b>	<b>w (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>L<sub>equivalente</sub> (m)</b>	<b>W (kN)</b>
MT-1	2.00	80.00	0.60	0.93
MT-2	2.00	80.00	2.73	4.28
MT-3	3.27	80.00	3.27	8.36
MT-4	3.13	80.00	0.65	1.59
MT-5	3.60	80.00	1.93	5.45
MT-6	2.00	80.00	1.33	2.08
MT-7	3.27	80.00	1.40	3.57
MT-8	3.60	80.00	3.20	9.04
MT-9	1.27	80.00	1.20	1.19
MT-10	1.27	80.00	1.20	1.19
MT-11	2.27	80.00	0.81	1.44
MT-12	2.27	80.00	1.59	2.83
MT-13	1.80	80.00	2.52	3.56
MT-14	2.66	80.00	2.52	5.26
MT-15	3.60	80.00	1.93	5.45

En la Figura 19 las flechas azules representan la carga de techo aplicada en cada uno de los nodos involucrados. Para efectos del modelo, las cargas se proyectaron a nivel del entrepiso (diafragma rígido), lo anterior puesto que al momento de aplicarlas en los nodos del diafragma flexible se generaban una serie de modos no representativos de la estructura analizada.



**Figura 19.** Carga de techo distribuida por área tributaria.

### **3.2 Medición en sitio de vibraciones ambientales**

Se realizaron mediciones de vibraciones ambientales en dos viviendas de mampostería de concreto integral ubicadas en el proyecto habitacional Avenir Condominio, el cual es desarrollado por la empresa VIVICON. Adicionalmente, se midió la frecuencia natural del suelo en la zona posterior de las viviendas.

Se presenta a continuación una caracterización detallada del equipo empleado para llevar a cabo las pruebas en las viviendas, así como una descripción de la metodología para efectuar dichas pruebas.

#### ***3.2.1 Caracterización del equipo utilizado***

Para llevar a cabo la primera medición de las vibraciones en la vivienda se emplearon tres acelerógrafos triaxiales de la marca Guralp, equipo facilitado por el LIS-UCR. Cada acelerógrafo cuenta con tres canales de medición: transversal, longitudinal y vertical.



**Figura 20.** Acelerógrafo Guralp para medir vibraciones ambientales.

Fuente: Guralp Systems, 2015

Entre las principales características de los acelerógrafos, cabe destacar, que cada uno de ellos pesa 9,0 kg, poseen un rango dinámico de 108 db y son capaces de registrar datos de 0,005 segundos (200 muestras por segundo), respuesta plana hasta los 50 Hz y una escala completa de  $\pm 2g$ . Al momento de realizar la medición, el equipo a emplear se traslada junto con su respectiva batería, y un cable de red para comunicarse con una computadora portátil.

Con respecto a la colocación de los acelerógrafos, es recomendable que tanto sus ejes transversales como sus ejes longitudinales se encuentren alineados. Además, cada acelerógrafo posee dos espacios para colocar memorias Flash, en estas se guardan los registros para posteriormente descargarlos a la computadora.

Se diseñan dos tipos de mediciones de vibraciones ambientales, la prueba traslacional y la prueba rotacional. La prueba traslacional se basó en la colocación de un acelerógrafo en la base de la estructura, y otro en el entrepiso, específicamente en el centro de rigidez. En el caso de la prueba rotacional, se planteó obtener el modo de torsión a partir del acelerógrafo ubicado en el centro de rigidez y otro acelerógrafo que se alternó entre dos extremos opuestos de la planta de entrepiso.

Originalmente el presente proyecto de investigación se planteó para una única vivienda, sin embargo, debido a la complejidad que presentó el análisis modal de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la vivienda 1, debido a que estos no concordaban con el comportamiento esperado, se tomó la decisión de efectuar una medición adicional en una segunda vivienda. Cabe mencionar que esta última edificación presenta la misma estructuración que la vivienda 1, por lo tanto, el modelo estructural elaborado es apto para ambas estructuras.

Con respecto a la prueba efectuada en la vivienda 2, se emplearon tres acelerógrafos modelo TitanSMA de la marca Nanometrics, los cuales de igual manera que en la primera medición, fueron facilitados por el LIS-UCR. Se tomó la decisión de emplear equipos de distinta marca, esto con el objetivo de corroborar si la complejidad en los resultados obtenidos de la vivienda 1 estaban asociados con los acelerógrafos utilizados para dicha vivienda (GURALP).

El equipo se configuró con una frecuencia de muestreo de 1000 Hz y capacidad de registrar aceleraciones de hasta 0,5 g. Además de los acelerógrafos, se trasladó al sitio de la medición baterías de los equipos, cables de red, tres GPS con los respectivos cables de conexión, y una computadora portátil.

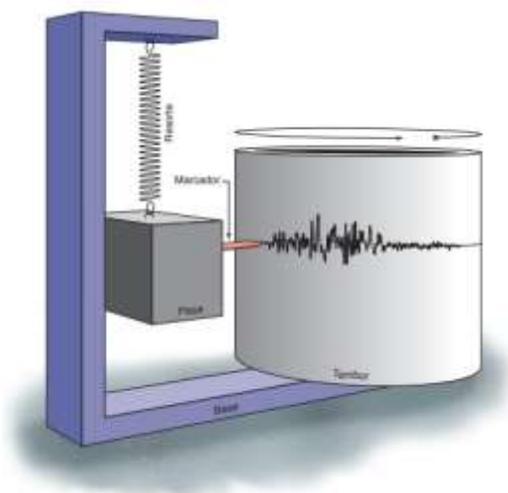


**Figura 21.** Acelerógrafo TitanSMA para medir vibraciones ambientales.

Fuente: Innovative Geophysical Solutions, 2015

El diseño de las pruebas para esta segunda medición es similar al caso de la primera medición, la diferencia radica que para la segunda medición la prueba rotacional se realizó ubicando únicamente el acelerógrafo en uno de los extremos.

Finalmente, haciendo uso de un sismógrafo Lennartz se llevó a cabo una medición directamente del suelo. El equipo consiste en un sensor que detecta el movimiento de la tierra llamado sismómetro, el cual está conectado a un sistema de registro y es sensible a movimientos verticales del terreno. El sismómetro puede ser visualizado como una pesa suspendida de un resorte que a su vez está suspendido sobre una base que se mueve con los movimientos de la superficie de la Tierra, tal como se aprecia en la Figura 22. Con el fin de añadir un sistema de registro, se coloca un tambor que gira en la base y un marcador sujeto al peso.



**Figura 22.** Configuración de un sismógrafo.

Fuente: Incorporated Research Institutions for Seismology, 2017

El diseño de la prueba con el Lennartz consistió en la colocación del equipo directamente sobre el suelo. Primero se tomó una medida en la zona posterior de la vivienda en estudio (Figura 23.a), posteriormente se tomó una segunda medida en un punto cercano a la propiedad donde se ubica el inmueble (Figura 23.b). Es importante realizar pruebas en sitios distintos con el fin de verificar si existen variaciones significativas en el comportamiento dinámico del suelo de un sitio a otro.

Se colocó una caja sobre el equipo, de manera que en la medida de lo posible factores externos al suelo, por ejemplo, el viento, no fuesen detectados por el sismógrafo.



**Figura 23.** Medición de la frecuencia del suelo con el sismógrafo Lennartz (a) Zona posterior de la vivienda (b) Punto cercano a la propiedad donde se ubica la vivienda.

### ***3.2.2 Metodología para efectuar las pruebas en sitio***

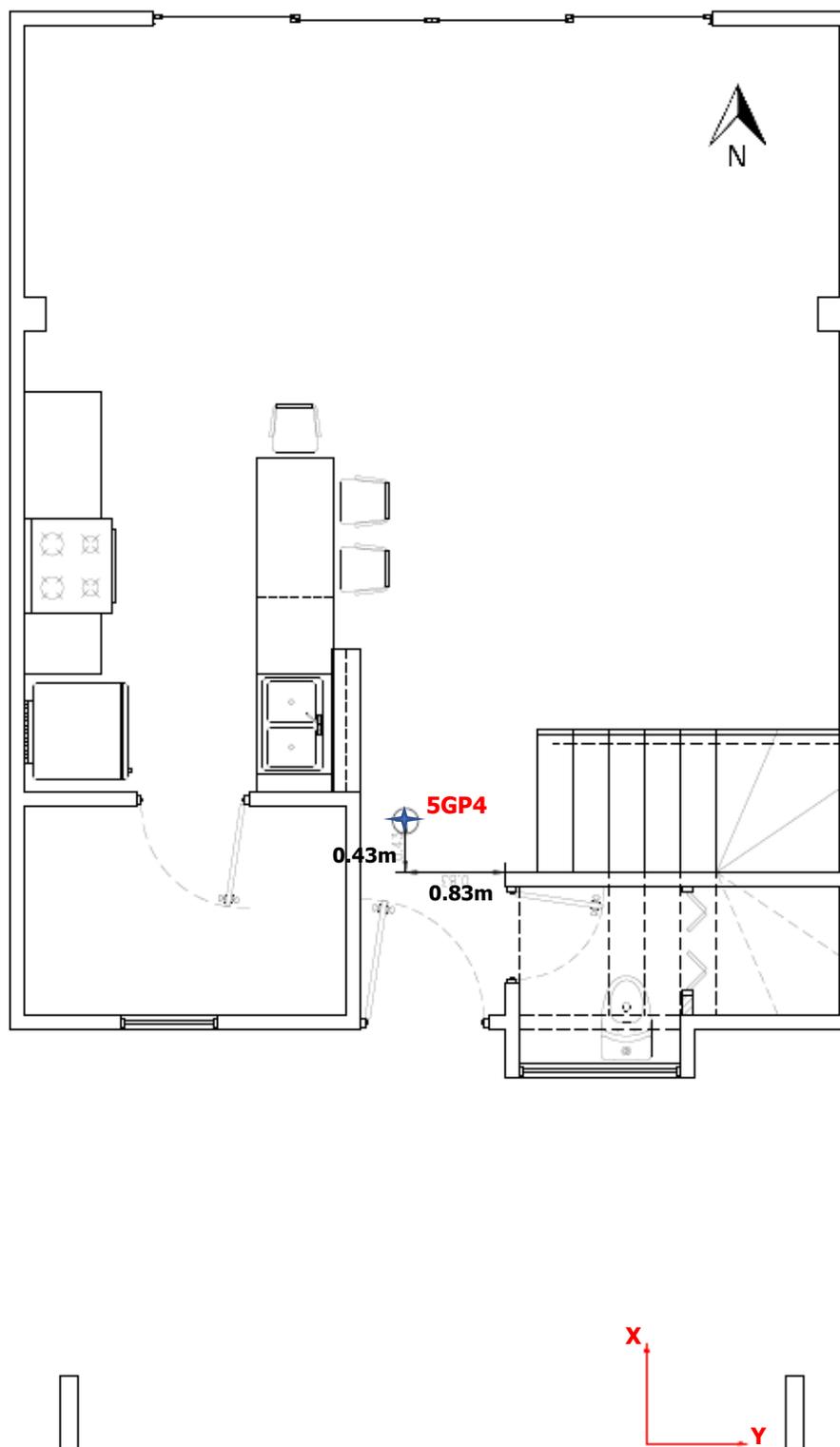
El primer paso para realizar las mediciones de vibraciones ambientales consistió en contactar al encargado administrativo del proyecto habitacional donde se encuentra la vivienda, el ingeniero Berny Valverde de la empresa constructora Vivicon, esto con la finalidad de solicitar el permiso respectivo para ejecutar las pruebas en la vivienda. Una vez con la aprobación del encargado, se solicitaron los planos constructivos de la edificación.

A partir de los planos de las viviendas en estudio, se visualiza de manera detallada las secciones de vigas y columnas que componen la estructura, sección de paredes y entepiso, así como las propiedades de los materiales empleados en la vivienda (resistencia a compresión del concreto, tipos de acero, calidad de la mampostería).

Se realiza una visita de inspección al sitio donde se ubica la vivienda 1 con el fin de corroborar la información que presentan los planos constructivos, identificar cambios recientes a los mismos, y observar al avance de la obra, esto último con el objetivo de analizar una fecha tentativa para llevar a cabo las mediciones de las vibraciones en la vivienda.

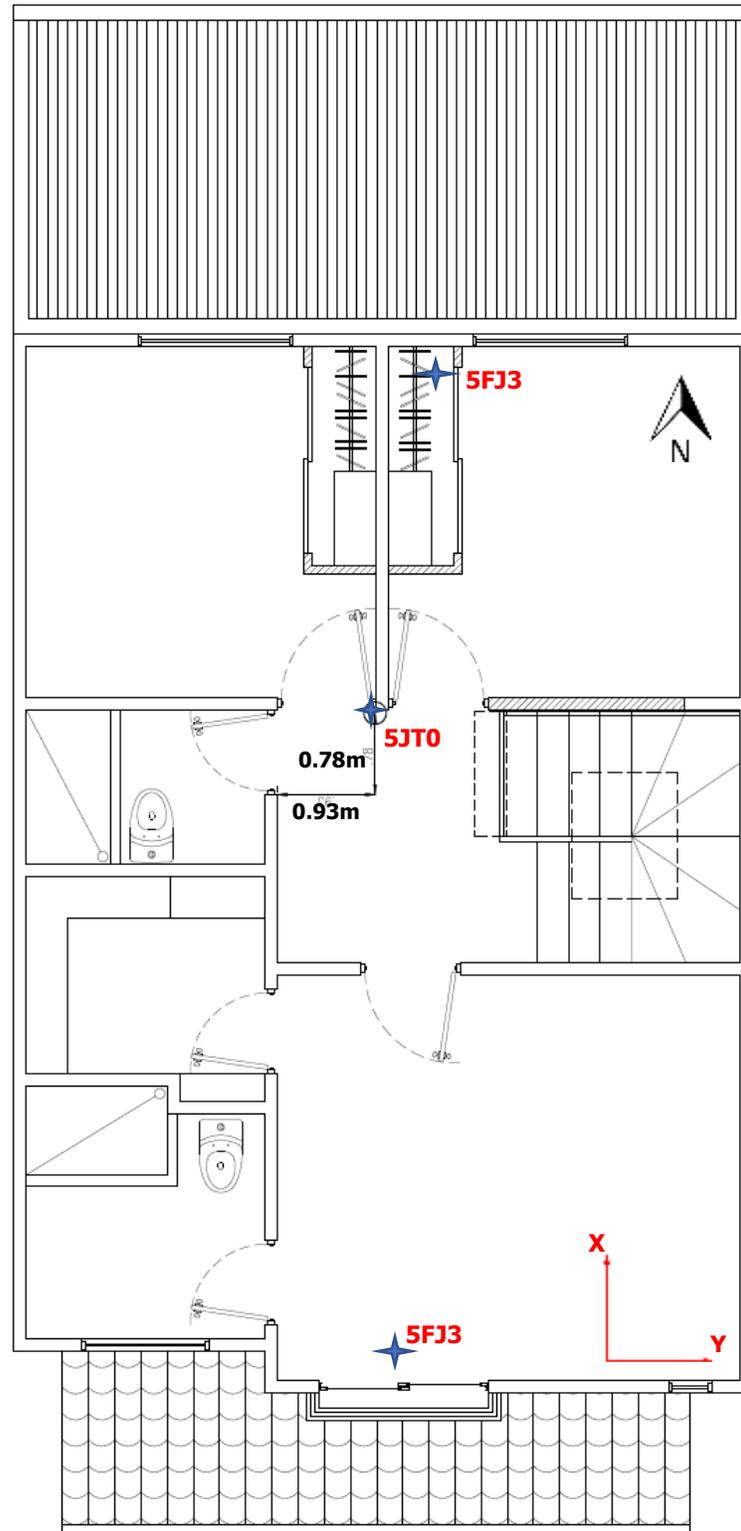
Una vez realizada la visita previa al sitio de interés y a partir de los planos brindados por los encargados del proyecto donde se ubican la vivienda, se procede a estimar el centro de rigidez y el centro de masa de la estructura. Para fines de los cálculos, la distribución de masas en la vivienda se concentra a nivel de entepiso, esto por tratarse de una estructura de dos niveles con diafragma rígido en entepiso y diafragma flexible a nivel de techo, dicha simplificación se establece con base en el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CFIA, 2011).

En las Figuras 25 y 26 se presentan esquemas de ubicación en planta de los acelerógrafos en el nivel uno y en el nivel dos de la vivienda 1, respectivamente. La medición en la segunda vivienda presenta una distribución similar en planta, con la diferencia que no se consideraron ambos extremos.



Escala 1:50

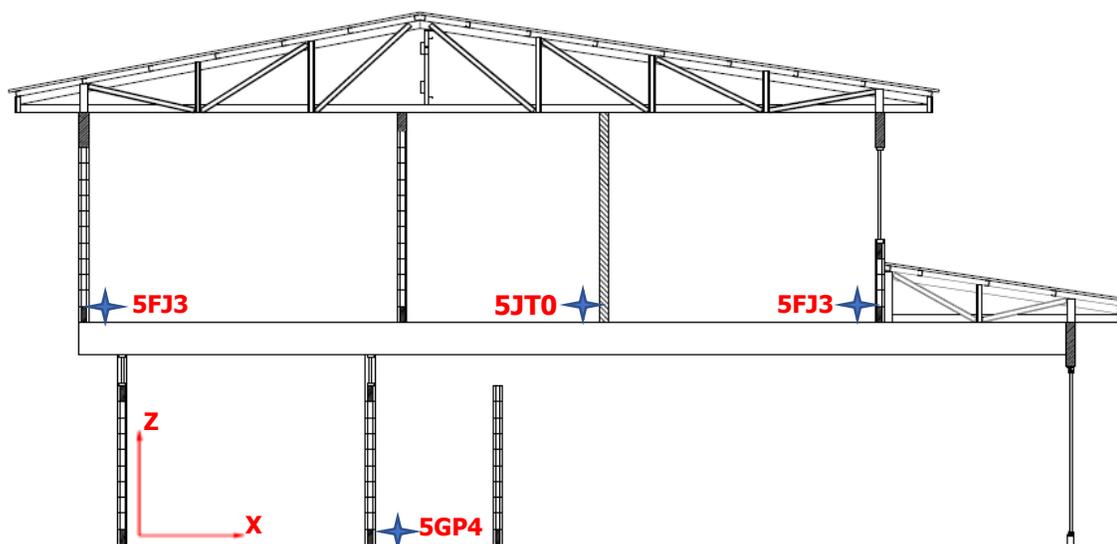
**Figura 24.** Esquema de ubicación en planta del acelerógrafo ubicado en el Nivel 1 (Proyección del Centro de masa).



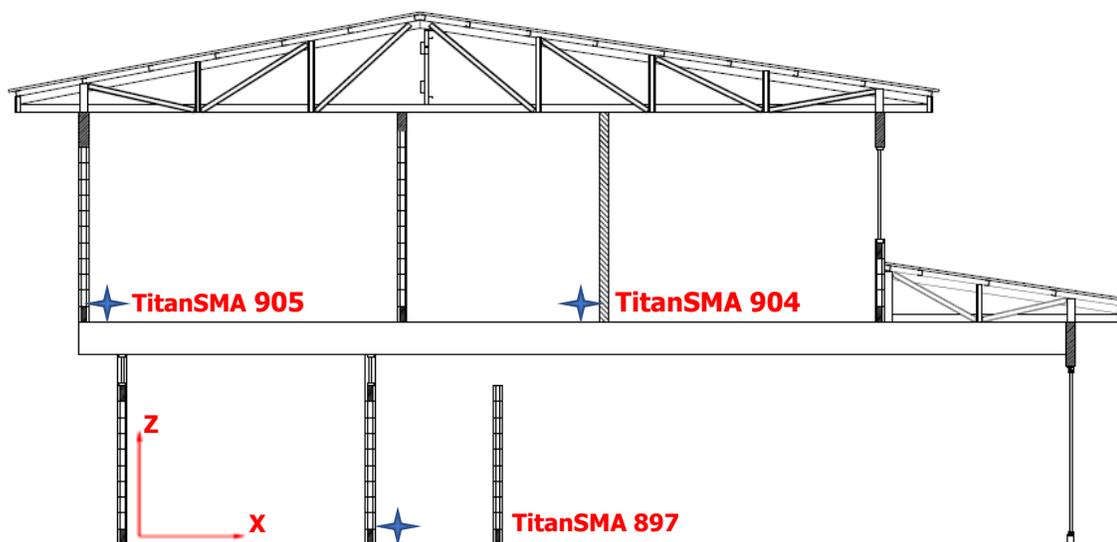
**Escala 1:50**

**Figura 25.** Esquema de ubicación en planta de acelerógrafos ubicados en el Nivel 2 (Centro de rigidez y extremos).

Asimismo, se presenta el esquema de ubicación en elevación de los acelerógrafos empleados para efectuar las pruebas en las estructuras. La diferencia entre ambas viviendas radica en el número de ejes empleados en cada una, para la vivienda 1 se utilizaron tres ejes de medición, mientras que para la vivienda 2 se emplearon dos ejes de medición.



**Figura 26.** Esquema de ubicación en elevación de los acelerógrafos empleados en la medición de la vivienda 1.



**Figura 27.** Esquema de ubicación en elevación de los acelerógrafos empleados en la medición de la vivienda 2.

Posterior a la obtención de las ubicaciones de los equipos en la vivienda, se realiza el contacto con el Ing. Berny Valverde Cubero para coordinar la fecha de ejecución de las mediciones. La fecha propuesta se define con base en la disponibilidad de la vivienda, así como la disponibilidad del equipo de medición y el personal técnico del LIS-UCR.

El día de ejecución de la prueba, previo a salir hacia el sitio de medición, es importante prestar atención a cada detalle, con el objetivo de evitar los contratiempos al momento de realizar la prueba. Se corrobora el debido funcionamiento de los acelerógrafos, baterías, cables, y la computadora portátil a emplear en la prueba. Además, se configuran los parámetros de frecuencia de muestreo y aceleración máxima en todos los acelerógrafos en 200 Hz y 4g, respectivamente.

Una vez en el sitio de medición se procedió a ubicar los acelerógrafos en los puntos previamente identificados: proyección del centro de masa en el primer nivel, centro de rigidez y extremos a nivel del entrepiso. Cabe mencionar que en las mediciones realizadas en la vivienda 1 no se contó con sistemas de posicionamiento global (GPS), por lo que no fue posible sincronizar temporalmente los equipos. Se llevó el registro de los tiempos de inicio y finalización de cada medición, así como también observaciones de situaciones en particular que se presentaran durante las pruebas. Adicionalmente, se prestó especial atención en no caminar muy cerca o generar ruidos fuertes cerca de los acelerógrafos.

Con respecto al tiempo de medición de cada una de las pruebas, de acuerdo con autores dedicados a la investigación y análisis de mediciones de vibraciones ambientales, se considera como satisfactorio ventanas de 20 minutos de medición (Brincker & Ventura, 2001; Ditomasso et al., 2010; Henao, 2013). Adicionalmente, Bendat y Piersol (2010) indican que una cantidad significativa de puntos mejora la estimación de los espectros cruzados, por lo tanto, se determinó confiable una duración mínima de 20 minutos en cada medición.

En el Cuadro 6 se presentan las características de las pruebas efectuadas en la vivienda 1 el día 14 de marzo de 2018: etiqueta de cada uno de los equipos empleados junto con su respectiva ubicación, hora y duración de las pruebas, así como las observaciones del caso.

**Cuadro 6.** Características de las pruebas de vibración ambiental en la vivienda uno (Guralp).

Prueba de medición 1 (M1V1)				
Acelerógrafo	Ubicación	Hora (am)	Duración	Observaciones
5GP4	Planta 1	10:23-10:43	20 min	10:23-10:33 Ruido producto de trabajos de construcción (martillo de percusión, cortado de acero)
5JT0	Planta 2 (CR)			
5FJ3	Planta 2 (Extremo 1)			
Prueba de medición 2 (M2V1)				
Acelerógrafo	Ubicación	Hora (am)	Duración	Observaciones
5GP4	Planta 1	11:00-11:20	20 min	Ninguna
5JT0	Planta 2 (CR)			
5FJ3	Planta 2 (Extremo 2)			

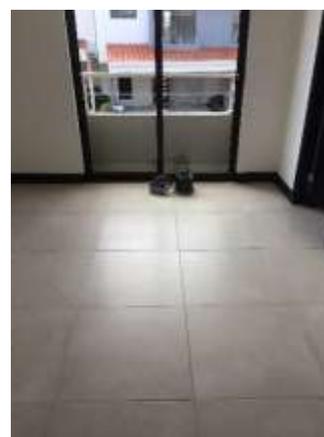
Se muestra en las Figuras 29 y 30 la configuración de las posiciones de los acelerógrafos marca Guralp para las mediciones de vibraciones ambientales realizada en la vivienda.



(a)

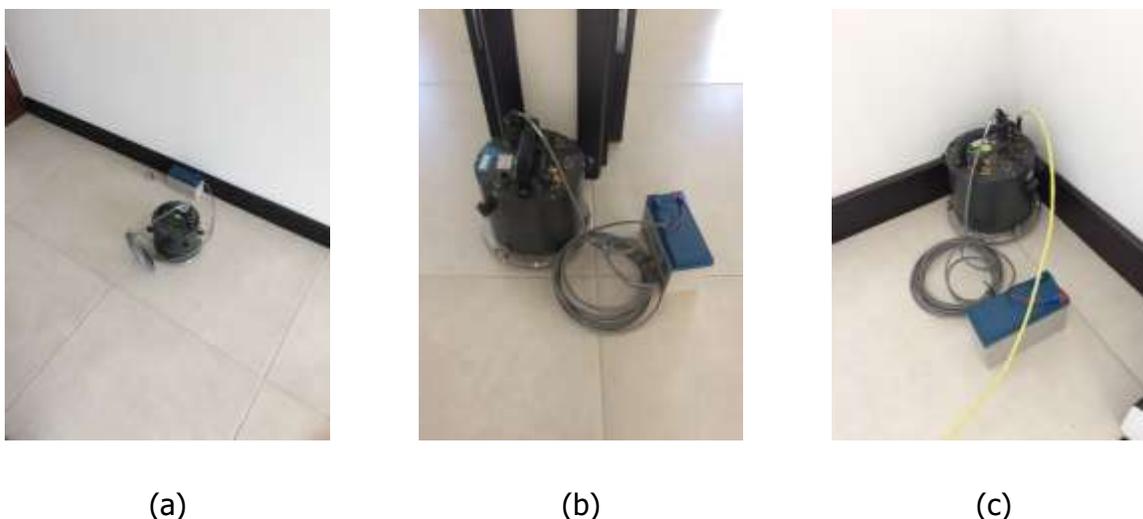


(b)



(c)

**Figura 28.** M1V1, a) Equipo de medición ubicado en el Nivel 1. b) Equipo de medición ubicado en el centro de rigidez. c) Equipo de medición ubicado en el extremo 1.



**Figura 29.** M2V1, a) Equipo de medición ubicado en el Nivel 1. b) Equipo de medición ubicado en el centro de rigidez. c) Equipo de medición ubicado en el extremo 2.

En el Cuadro 7 se presentan las características de la tercera medición realizada en el Proyecto, tal es el caso de la etiqueta del equipo, ubicación, tiempo de medición, y observaciones. En este caso se utilizaron acelerógrafos Nanometrics para efectuar las mediciones de las vibraciones. Únicamente se presenta un equipo en uno de los extremos, esto puesto que se consideró suficiente para efectos de obtener la frecuencia del modo rotacional de la estructura. Se configuran los parámetros de frecuencia de muestreo y aceleración máxima en todos los acelerógrafos en 1000 Hz y 4g, respectivamente. La fecha de realización de esta prueba fue el 8 de agosto de 2018.

**Cuadro 7.** Características de las pruebas de vibración ambiental en la vivienda 2 (Nanometrics).

<b>Prueba de medición única (M1V2)</b>				
<b>Acelerógrafo</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Hora (am)</b>	<b>Duración</b>	<b>Observaciones</b>
TitanSMA 897	Planta 1	11:00-11:20	20 min	No se presenta ruido ni interrupciones durante la prueba.
TitanSMA 904	Planta 2 (CR)			
TitanSMA 905	Planta 2 (Extremo 1)			

Se muestra en las Figura 30 la configuración de las posiciones de los acelerógrafos Nanometrics para las mediciones de vibraciones ambientales realizada en la vivienda.



(a)

(b)

(c)

**Figura 30.** M1V2, a) Equipo de medición ubicado en el Nivel 1. b) Equipo de medición ubicado en el centro de rigidez. c) Equipo de medición ubicado en el extremo 1.

En el LIS-UCR se extrajeron los datos recopilados mediante los acelerógrafos, y se efectuó una inspección visual rápida para verificar que los registros almacenados en los equipos fuesen grabados adecuadamente. Posterior a esta verificación se eligió un programa para llevar a cabo el procesamiento de las señales de vibraciones ambientales.

### **3.3 Procesamiento de análisis espectral**

#### ***3.3.1 Tratamiento de las señales obtenidas en campo***

El tratamiento de las señales obtenidas de las mediciones efectuadas en campo es una etapa importante previo a la aplicación del análisis espectral. Esta etapa se lleva a cabo haciendo uso de la herramienta de programación MATLAB.

El tratamiento de las señales implica la extracción de los datos registrados en sitio, aplicación de unidades, cortar las señales (ventaneo), corregir por línea base, filtrar y acotar los registros.

### 3.3.1.1 Extracción de datos y aplicación de unidades

Los registros de datos de las señales acelerográficas se extrajeron del disco de almacenamiento de los acelerógrafos al equipo donde se realizó el tratamiento. Seguidamente, los datos se organizaron en carpetas de acuerdo con la etiqueta asociada a cada instrumento y a la ubicación de este en la estructura a la hora de realizar las mediciones (extremo, centro de rigidez, proyección de centro de masa).

En MATLAB a las señales medidas de las vibraciones ambientales se les aplicó un factor de conversión de unidades (F), esto para transformar las unidades de cuentas a aceleraciones. El factor de conversión de unidades de los Guralp se determinó mediante la siguiente ecuación, la cual es definida por el fabricante del equipo:

$$F = \frac{VPCx10^{-6}}{G} \cdot 100 \quad [\text{Ec.22}]$$

Donde, tanto VPC como G son parámetros de calibración del instrumento Guralp. En el Cuadro ## se presentan los valores de dichos parámetros asociados a cada uno de los sensores.

**Cuadro 8.** Constantes de calibración de los sensores Guralp

Dirección	Acelerógrafo					
	5GP4		5JT0		5FJ3	
	VPC	G	VPC	G	VPC	G
Norte	3,2078	0,508				
Este	3,20863	0,508				

### 3.3.1.2 Sincronización y ventanas de corte

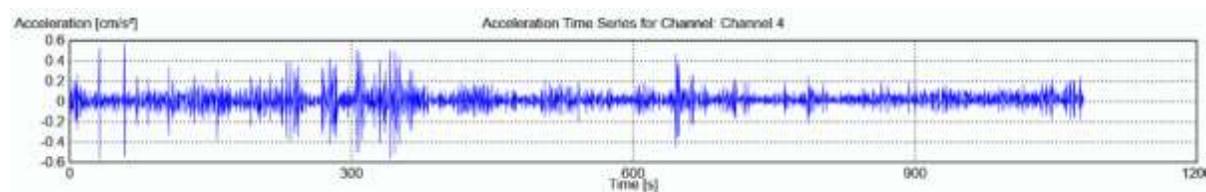
Para la medición realizada en la primera vivienda no se utilizó ningún tipo de equipo para sincronizar los acelerógrafos, en su lugar, se sincronizaron manualmente las señales de cada uno de los sensores, de manera que el tiempo inicial de cada registro coincidiera con bastante precisión. En el caso de la medición efectuada en la segunda vivienda, los sensores fueron sincronizados temporalmente mediante Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés).

Una vez con los archivos sincronizados, se procedió a efectuar el corte de las señales acelerográficas de acuerdo con las horas de medición.

### 3.3.1.3 Corrección de línea base y eliminación de tendencia

En ocasiones los valores obtenidos del registro de señales se presentan desplazados con respecto al origen, usualmente se debe a aspectos internos del equipo de medición. Se considera la falta de nivelación de los sensores como la principal causa del corrimiento, y el mismo consiste en la porción de aceleración de la componente vertical leída en la dirección horizontal. Adicionalmente, las señales podrían mostrar algún tipo de tendencia lineal, ya sea debido a ruidos de baja frecuencia, a condiciones propias de los instrumentos o su localización (Henaó, 2013).

La corrección de línea base permite transformar los valores de la muestra en un nuevo conjunto de valores con promedio de muestra igual a cero (Bendat & Piersol, 2010). Este procedimiento resulta conveniente dentro de la preparación de los datos para su correcto análisis. Una vez efectuada la corrección de línea base y la eliminación de tendencia se obtuvo una señal como la que se muestra en la Figura 32.



**Figura 31.** Línea base corregida y eliminación de tendencia de señal registrada en el sensor ubicado en el Nivel 0 de la estructura

### 3.3.1.4 Filtrado y acotado

El filtrado permite pasar el contenido espectral de una señal de entrada en una cierta banda específica de frecuencias. El tipo de filtro que se utiliza depende del tipo de frecuencias que se desean eliminar: para el caso de las frecuencias altas el filtro recomendado es pasa baja, para bajas frecuencias se emplea el pasa alta, pasa banda en el caso que se deseen eliminar altas y bajas frecuencias dejando únicamente un rango determinado de frecuencias, y quita banda para descartar frecuencias en un tramo específico y dejar altas y bajas frecuencias.

Para fines del proyecto de investigación, se utilizó un filtro pasa banda con el fin de eliminar frecuencias altas producto de las actividades constructivas que se desarrollaban cercanas al sitio donde se realizaron las mediciones de las vibraciones y eliminar frecuencias muy bajas, las cuales no representan el comportamiento esperado de la estructura. El filtro pasabanda se definió entre las frecuencias 0,1 Hz y 100 Hz.

Finalmente, se aplicó una función de acotado (taper) que permite suavizar los extremos de las señales. El objetivo del taper es reducir el efecto de discontinuidad al inicio y al final de la señal, el cual puede generar errores en los espectros de Fourier.

### **3.4 Resultados del procesamiento de las señales medidas en campo**

En total se realizaron tres mediciones de vibraciones ambientales, distribuidas de la siguiente manera, dos mediciones en la vivienda 1 y la medición restante en la vivienda 2. Con respecto a las mediciones en la vivienda 1, los resultados que se desprenden de la primera medición (M1V1) no resultan satisfactorios, una de las posibles causas puede estar relacionada al exceso de ruido ocasionado por las labores constructivas que se desarrollaban en el proyecto al momento de tomar la medición.

El proyecto de investigación originalmente solo contemplaba las mediciones M1V1 y M2V1, sin embargo, debido a la dificultad que representó la lectura e identificación de los modos en la vivienda 1, se tomó la decisión de realizar una medición adicional en una nueva estructura (M1V2).

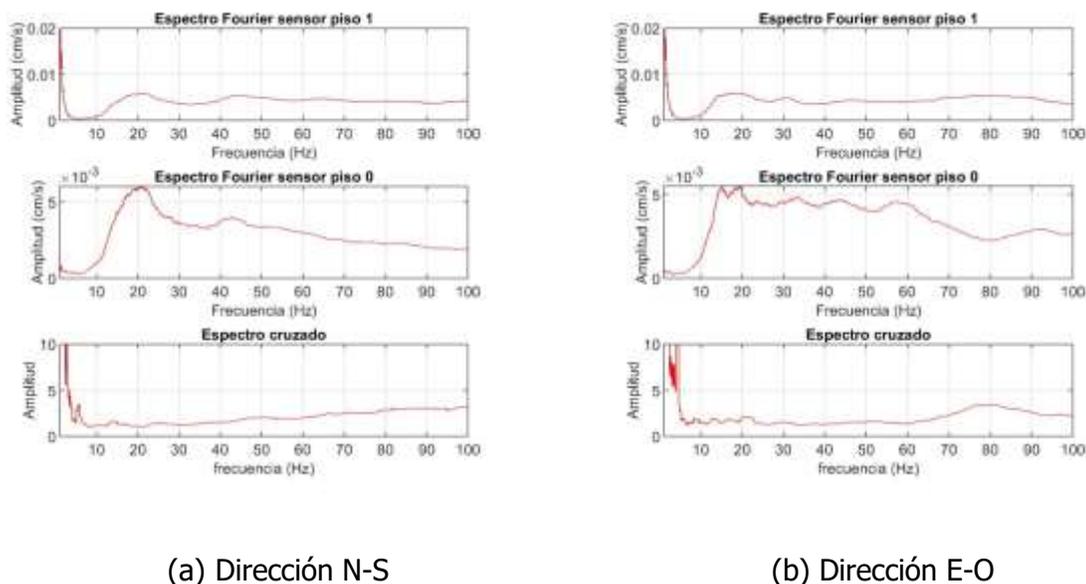
Los resultados obtenidos del análisis espectral se vieron limitados a la alta rigidez que presentan las estructuras analizadas, de manera que la identificación de las formas modales y las respectivas frecuencias naturales resultó en una tarea más laboriosa que en el caso de estructuras flexibles.

#### ***3.4.1 Resultados de la medición 1 en la vivienda 1 (M1V1)***

Se presentan los resultados asociados a la primera medición efectuada en la vivienda 1. Es importante indicar que al momento de realizar la prueba el ruido producto de labores constructivas en el sitio fue constante. Adicionalmente, los sensores empleados para la obtención de las señales no se encontraban sincronizados debido a que para esta medición no se contó con los GPS.

En la Figura 32 se muestran los Espectros de Fourier obtenidos para el eje fuerte y el eje débil de la estructura, tanto para el sensor ubicado en el entrepiso de la vivienda (piso 1) como para el sensor ubicado en la planta baja (piso 0).

La marcada diferencia en la magnitud de las amplitudes de los Espectros de Fourier entre ambos niveles no permite obtener resultados satisfactorios en el cálculo de los espectros cruzados.



(a) Dirección N-S

(b) Dirección E-O

**Figura 32.** Espectros de Fourier y espectros cruzados obtenidas de la M1V1 en las direcciones (a) N-S  
(b) E-O

### ***3.4.2 Resultados de la medición 2 en la vivienda 1 (M2V1)***

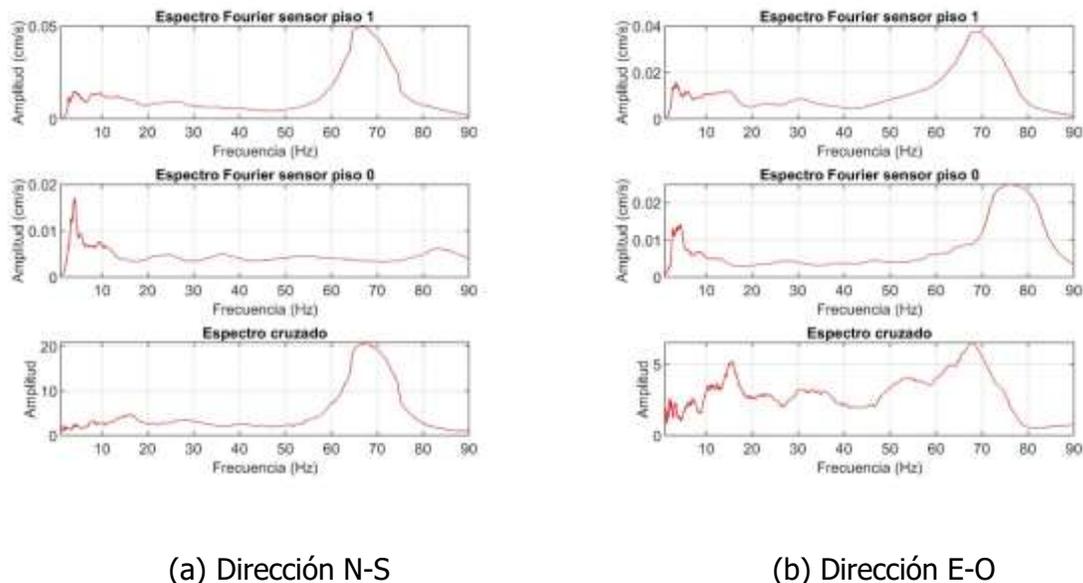
Similar que en el caso de la vivienda 1, la presencia de trabajos constructivos en las cercanías de la vivienda podría explicar las altas frecuencias en el rango de los 60 Hz-80 Hz, lo anterior dado que dichos valores no son propios del sistema estructural en estudio.

La similitud en la magnitud de las amplitudes de los Espectros de Fourier en ambas direcciones permite observar ciertos picos en los espectros cruzados, especialmente en el sentido débil de la estructura. Respecto a los resultados que se observan en el espectro cruzado en la dirección E-O es posible visualizar la presencia de un pico alrededor de la frecuencia de 15,0 Hz, el cual es un valor que se aproxima al comportamiento dinámico de una estructura tipo muro.

Además, se aprecia en ambas direcciones de los Espectros de Fourier para el rango de frecuencias entre los 0 Hz y 5 Hz cierta respuesta de la estructura. Debido a que este rango de frecuencias no es propio de la edificación, incluso, suele tender hacia los valores de frecuencias que podría experimentar el suelo, se llevó a cabo una medición complementaria que permitiera corroborar esta premisa. Dicha prueba se denomina H/V y los principales

hallazgos que se desprenden de la misma se documentan posteriormente en este capítulo de Resultados.

Asimismo, llama la atención como estas bajas frecuencias se ven reflejadas en el sensor ubicado en el CR de la estructura, comportamiento que no es el esperado en caso de tratarse de frecuencias asociadas a la dinámica del suelo.



**Figura 33.** Espectros de Fourier y espectros cruzados obtenidas de la M2V1 en las direcciones (a) N-S (b) E-O

### 3.4.3 Resultados de la medición en la vivienda 2 (M1V2)

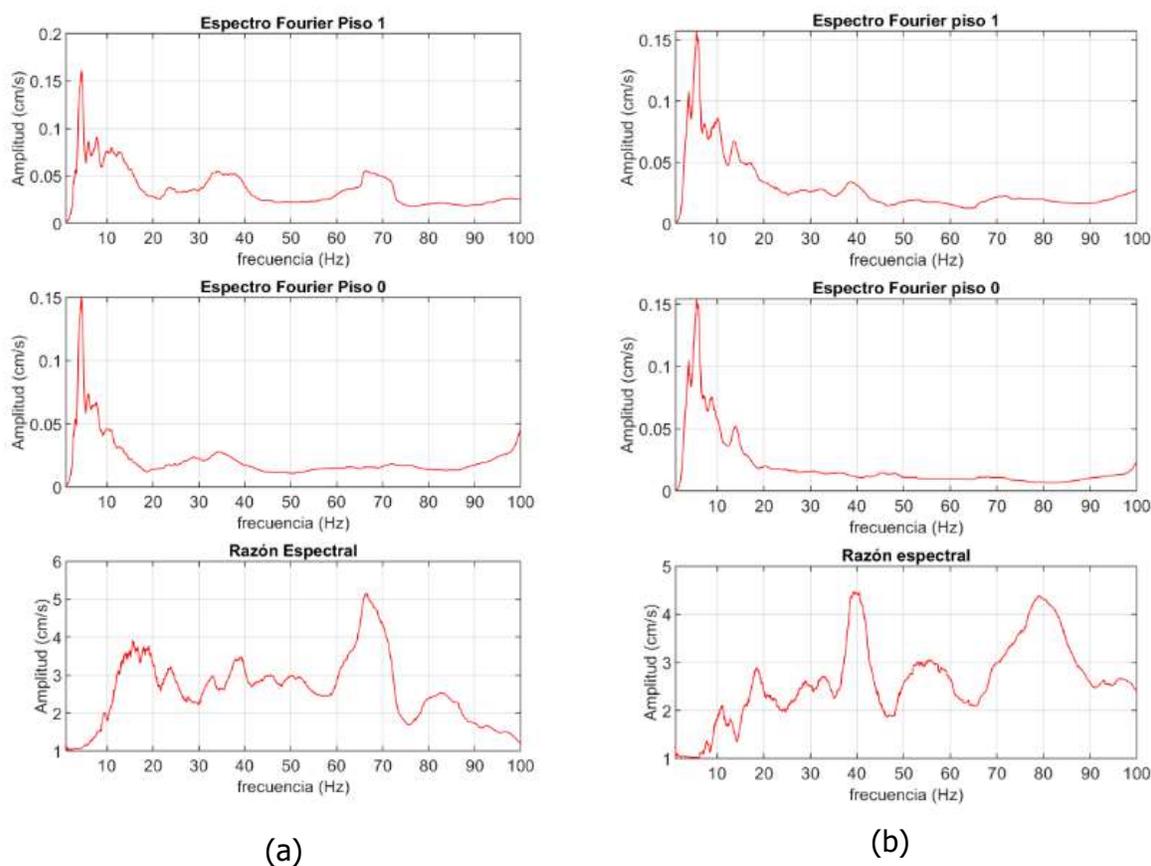
#### 3.4.3.1 Prueba traslacional

Mediante las mediciones de vibraciones ambientales efectuadas en la vivienda dos se determinan los espectros de Fourier y los espectros cruzados de dichos espectros. A partir de los resultados obtenidos se determinan las frecuencias asociadas a los modos de traslación de la estructura en estudio.

Los espectros de Fourier en los dos niveles de la vivienda, tanto en la dirección E-O (eje débil) como en la dirección N-S (eje fuerte), presentan un pico aproximadamente en la frecuencia de 5,0 Hz a una amplitud de 0,15. La mayor energía espectral se concentra en la banda de frecuencias entre 4,0 Hz y 10,0 Hz. Adicionalmente, se aprecia en la Figura 34 que

la amplitud en los espectros es proporcional a la elevación del inmueble, lo cual es el comportamiento esperado puesto que las vibraciones en plantas superiores evidencian un mayor nivel de energía que en plantas inferiores.

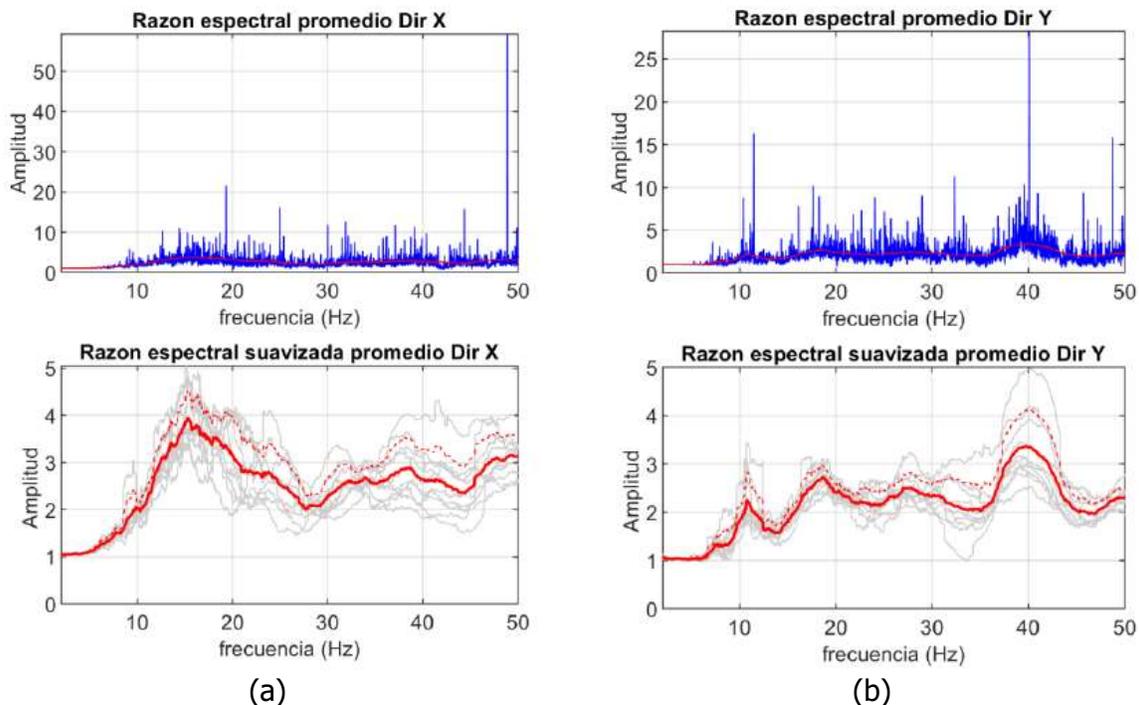
Ahora bien, el espectro cruzado en la dirección del eje débil de la estructura (Figura 34.a) presenta un valor cercano a los 15,0 Hz. Aunque este valor no se refleje como un modo claramente definido, dada la forma que presenta en el gráfico, se considera como el principal modo de flexión en la dirección E-O. En el caso del espectro cruzado en la dirección del eje fuerte (Figura 34.b), se observa un pico bien definido en la frecuencia de 40,0 Hz, lo que implicaría una rigidez significativamente alta de la estructura, muy por encima del valor de referencia del CSCR-2010.



**Figura 34.** Espectros de Fourier y sus espectros cruzados de la medición efectuada en la vivienda 2  
(a) Dirección E-O (b) Dirección N-S.

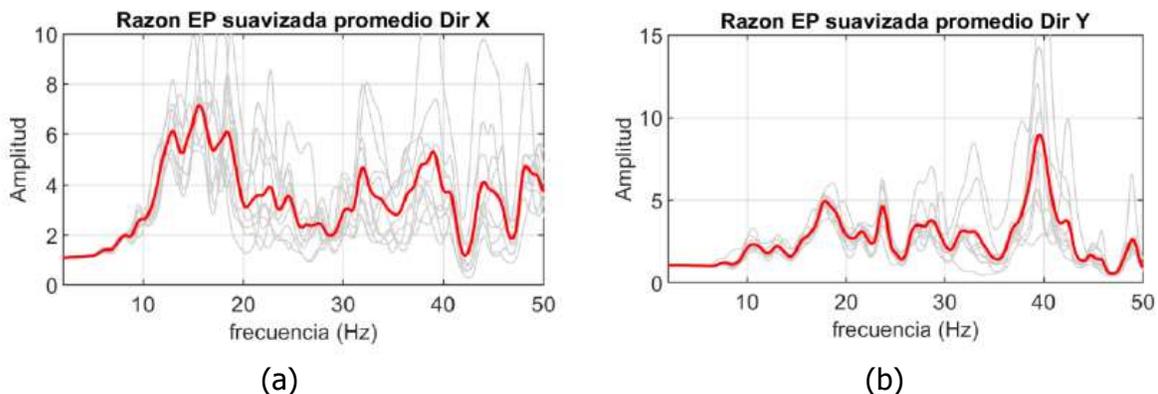
En la Figura 35 se muestran los espectros cruzados promedio obtenidos a partir del tratamiento de las señales en diez ventanas de ochenta segundos y un traslape de 20%. En la parte superior se presentan los espectros sin suavizar, y en la parte inferior la versión

suavizada de los espectros cruzados, el valor promedio y el margen con una desviación estándar. Nuevamente en la dirección E-O se visualiza un pico alrededor de la frecuencia de 15,0 Hz, mientras tanto, en la dirección N-S no se logra observar un modo predominante.



**Figura 35.** Espectros cruzados promedio sin suavizar y suavizados de la medición efectuada en la vivienda 2 (a) Dirección E-O (b) Dirección N-S.

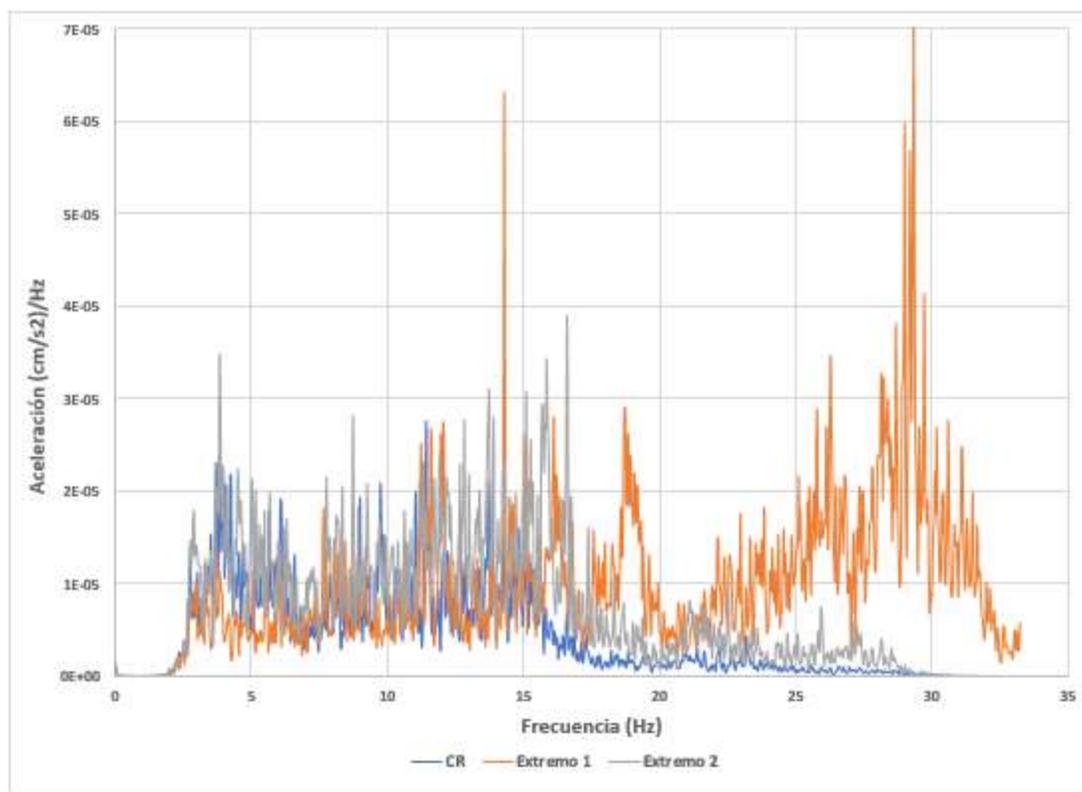
Una herramienta importante para identificar los modos traslacionales de vibración son los espectros de potencia promedio, esto en el caso de estructuras de alta rigidez, baja altura, y desplantadas sobre suelo firme (Carrillo, 2009). Las características anteriores propician un movimiento de cuerpo rígido, dificultando la identificación de los modos propios de la vivienda. Los resultados que se observan en la Figura 35 ratifican los valores previamente analizados, la frecuencia de 15.0 Hz en la dirección E-O y 40.0 Hz en la dirección N-S.



**Figura 36.** Espectros cruzados de potencia promedio de la medición efectuada en la vivienda 2 (a) Dirección E-O (b) Dirección N-S.

### 3.4.3.2 Prueba rotacional

Se presenta en la Figura 37 el autoespectro en la dirección E-O de la prueba rotacional en la vivienda 1. Solamente se muestra el autoespectro en esta dirección, esto porque debido a la configuración de la vivienda es el único eje donde es posible una rotación cuantificable de la estructura.



**Figura 37.** Autoespectro en la dirección E-O obtenido de la prueba rotacional en la vivienda 1.

Con relación al autoespectro analizado, no se visualiza con claridad un comportamiento de rotación de la planta. Aunque en la frecuencia de 14,33 Hz se observa una amplitud bastante superior en el extremo uno con respecto al sensor posicionado en el centro de rigidez, no es así el caso en sensor del extremo 2, por lo tanto, no se asocia esta frecuencia a un modo de torsión.

En la banda de frecuencias entre 23,0 Hz y 33,0 Hz se presentan amplitudes significativamente altas en el sensor ubicado en el extremo uno, lo cual se prevé es producto del ruido de las labores constructivas cercanas al sitio de medición. En el caso del sensor en el extremo dos, cuando se efectuó la segunda medición las labores de construcción se detuvieron momentáneamente en el Proyecto donde se ubica la vivienda.

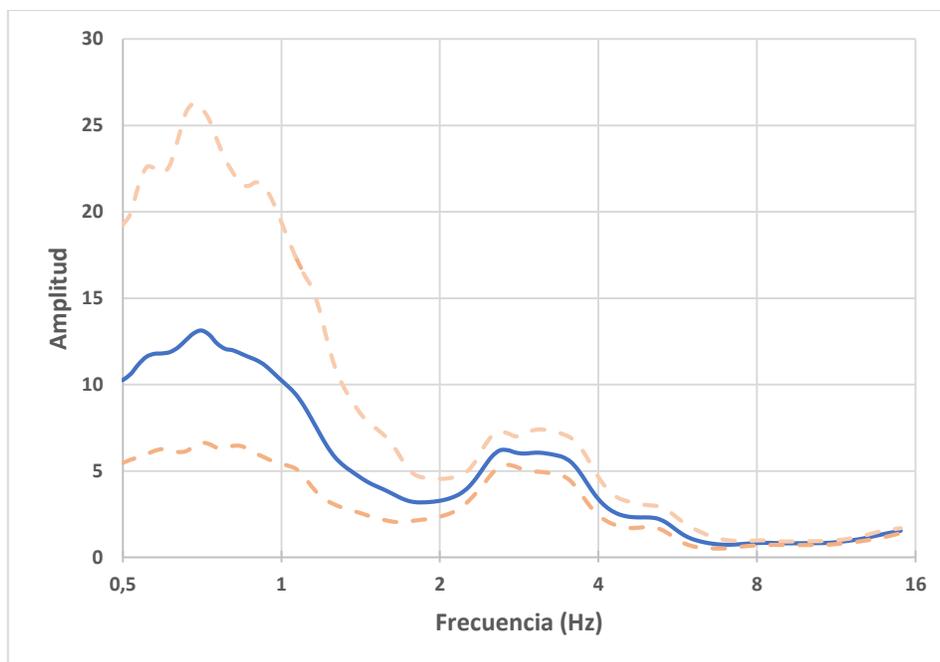
### **3.5 Prueba H/V**

La razón espectral H/V es un método propuesto por Nakamura (1989), consiste en tomar de un registro de señales la componente horizontal del espectro de Fourier y dividirlo por la componente vertical de dicho espectro.

La teoría detrás de la razón H/V se fundamenta en el hecho que en el basamento el movimiento horizontal y el vertical presentan magnitud y forma de onda similares (Fonseca & Schmidt, 2018). A medida que las vibraciones atraviesan el perfil del suelo hasta llegar a la superficie, el movimiento horizontal es amplificado por reflexiones múltiples, mientras que el vertical mantiene su amplitud original.

La prueba H/V se llevó a cabo con el fin de relacionar las frecuencias bajas observadas en los espectros de respuesta con la frecuencia natural del suelo, esto con el fin de brindar una interpretación adecuada a dichas frecuencias.

Del gráfico se observa un primer pico en un rango de frecuencias entre 0,5 – 1,0 Hz, sin embargo, del mismo no se puede extraer información confiable puesto que existe una considerable desviación estándar respecto al valor promedio. La banda de frecuencias aproximadamente entre 2,5 – 3,5 Hz se estiman como los valores representativos del comportamiento dinámico del suelo, no obstante, debido a la forma del pico se dificulta indicar con claridad un único valor de la frecuencia natural del suelo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la medición realizada mediante el sismógrafo Lennartz.



**Figura 38.** Resultados de la frecuencia natural del suelo.

Un pico ancho, como el obtenido de los resultados del análisis dinámico del suelo, sugiere grandes variaciones laterales de la estratigrafía o un basamento con una pendiente considerable, de acuerdo con Fonseca y Schmidt (2018). Aunque el sitio donde se ubican las viviendas no presenta variaciones topográficas fuertes, no es posible afirmar con certeza que el basamento no presente inclinación alguna.

Como se desprende del gráfico, los resultados del análisis dinámico del suelo no concuerdan consistentemente con las frecuencias observadas alrededor del pico de 5,0 Hz en los espectros de respuesta del análisis modal de la M1V2. Por su parte, en el caso de las frecuencias bajas observadas en la M2V1, aunque existe similitud en el rango de frecuencias obtenido, se considera que no son suficientemente concluyentes para evidenciar una respuesta del suelo en la estructura.

### 3.6 Calibración del modelo

La etapa de calibración del modelo consiste en ajustar parámetros de este, de manera que los resultados obtenidos de la modelación se aproximen a los resultados obtenidos de las mediciones efectuadas en campo. En primera instancia, se presentan los parámetros dinámicos de la vivienda obtenidos a partir del modelo en su versión original, esto es previo a realizar cualquier tipo de calibración.

**Cuadro 8.** Periodo y porcentajes de masa efectiva obtenidos del modelo sin calibrar.

Modo	Porcentaje de masa efectiva			Parámetros	
	Dirección Ux	Dirección Uy	Rotación Rz	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
<b>1</b>	<b>0,00%</b>	<b>99,84%</b>	<b>0,22%</b>	<b>9,02</b>	<b>0,111</b>
2	1,22%	0,00%	0,32%	24,83	0,040
3	0,63%	0,06%	2,53%	41,68	0,024
4	2,15%	0,08%	9,47%	47,19	0,021
<b>5</b>	<b>34,67%</b>	<b>0,00%</b>	<b>8,05%</b>	<b>57,59</b>	<b>0,017</b>
6	2,02%	0,02%	57,40%	67,54	0,015
7	45,58%	0,00%	10,52%	73,40	0,014
8	6,12%	0,00%	0,83%	124,29	0,008

La dirección y (Este-Oeste) en el cuadro anterior se relaciona con el eje débil de la estructura, mientras que la dirección x (Norte-Sur) representa el eje fuerte. Como se puede observar del cuadro, el primer modo de vibración de la vivienda se presenta como un modo desacoplado, donde prácticamente el cien por ciento de la masa participativa se concentra en la dirección Este-Oeste de la estructura.

Se procede a realizar la calibración del primer modo de vibración obtenido del modelo, de manera que el periodo asociado a dicho modo se ajuste a su valor experimental. Como un primer acercamiento a la calibración del modelo, se varía el valor del módulo de elasticidad y la resistencia a compresión de la mampostería en el modelo, para este fin se utilizan los valores indicados en el artículo "Propiedades a compresión de la mampostería de bloques de concreto", Navas (2007).

**Cuadro 9.** Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad promedio para cada tipo de prisma de mampostería.

Tipo de prisma	$f'_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
SR-1	160	143187
SR-2	141	130299
SR-3	99	103363
SR-4	82	76512
SR-5	82	80161
SR-6	70	57746
SR-7	66	56983
SR-8	69	62739
SR-9	69	65042

Fuente: Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Navas, 1999; Rodríguez, 1999; modificado por el autor, 2018

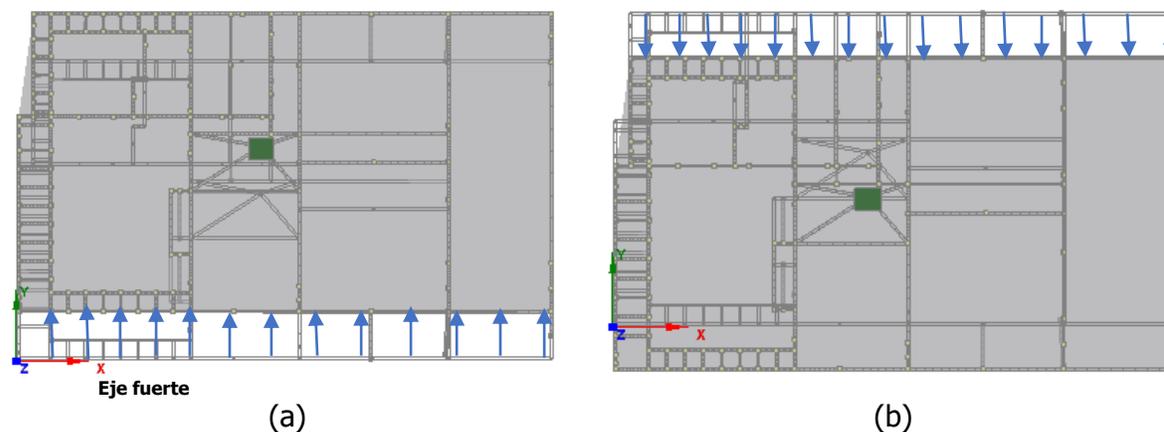
Para efectos de la calibración se emplean los valores máximos, los cuales están asociados al tipo de prisma SR-1. Este prisma se caracteriza por no presentar relleno, el bloque se clasifica como clase A, así como también el mortero empleado, y su espesor nominal es de 12 cm. En el siguiente cuadro se muestran los resultados del modelo para la configuración del prisma tipo SR-1: resistencia a compresión de 160 kg/cm<sup>2</sup> y módulo de elasticidad de 143187 kg/cm<sup>2</sup>.

**Cuadro 10.** Periodo y porcentajes de masa efectiva obtenidos del modelo calibrado a partir de parámetros del prisma tipo SR-1.

Modo	Porcentaje de masa efectiva			Parámetros	
	Dirección Ux	Dirección Uy	Rotación Rz	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
<b>1</b>	<b>0,00%</b>	<b>99,87%</b>	<b>0,19%</b>	<b>14,69</b>	<b>0,068</b>
2	1,05%	0,00%	0,23%	25,44	0,039
3	2,08%	0,01%	7,10%	55,42	0,018
<b>4</b>	<b>32,06%</b>	<b>0,01%</b>	<b>15,52%</b>	<b>63,55</b>	<b>0,016</b>
5	0,70%	0,09%	1,39%	73,71	0,014
6	18,71%	0,02%	14,69%	80,86	0,012
7	30,42%	0,00%	37,19%	103,80	0,010
8	8,29%	0,00%	5,78%	175,72	0,006

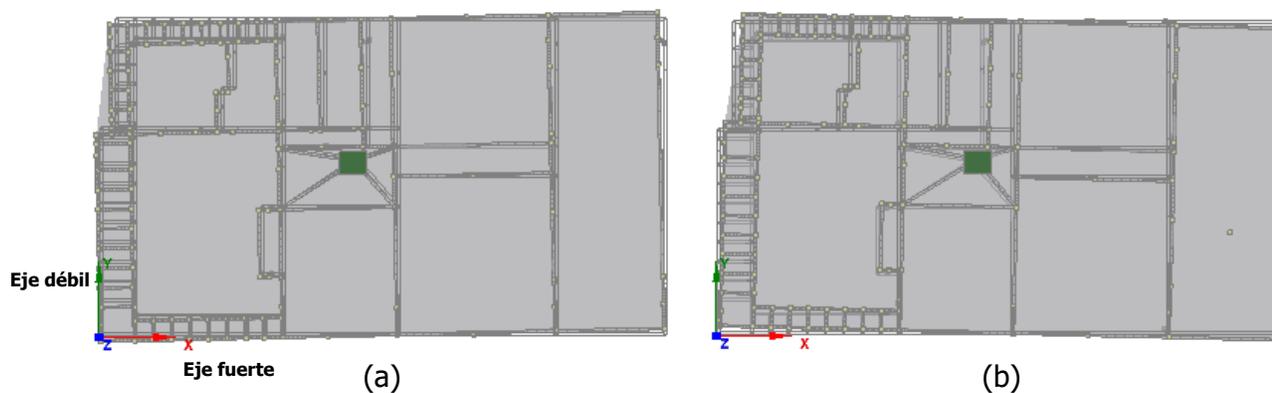
La frecuencia natural obtenida de la calibración del modelo estructural es 14,7 Hz, y como se observa del cuadro anterior, dicha frecuencia se asocia a un modo desacoplado en la

dirección del eje menos rígido de la estructura, con un 99,87% de masa participativa actuando en dicha dirección y prácticamente una participación nula en los ejes de rotación. En la siguiente figura se muestra una vista en planta de la forma modal de la estructura asociada a la frecuencia indicada anteriormente, en la misma se logra apreciar el comportamiento de modo desacoplado que presenta la edificación en la dirección de su eje débil.



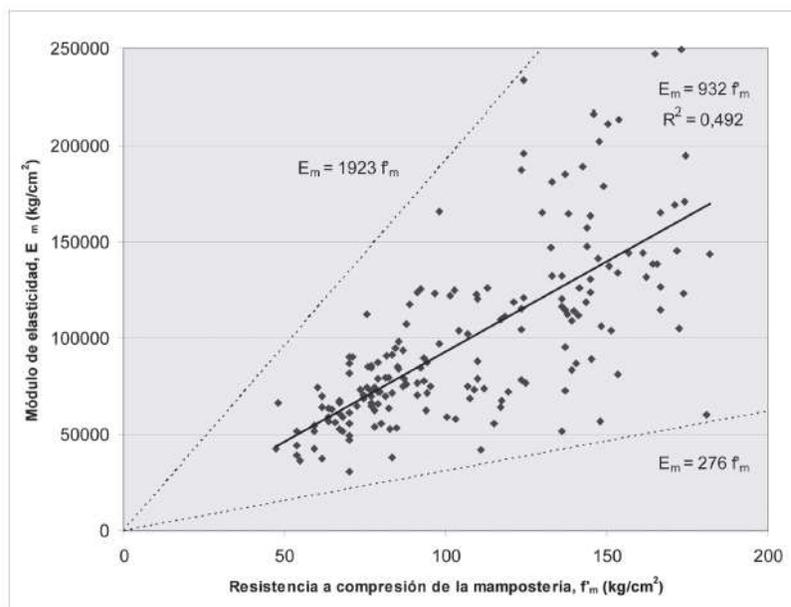
**Figura 40.** Forma modal de la frecuencia obtenida del ajuste (a) Deformación en el sentido "y" positivo (b) Deformación en el sentido "y" negativo

Respecto al modo que rige en el sentido fuerte de la estructura, este presenta un porcentaje de masa participativa de 32,1% actuando en la dirección del eje x, a su vez, se observa una participación de 15,5% de la masa de la estructura rotando alrededor del eje z. En la Figura 27 se evidencia el acoplamiento existente entre las deformadas asociadas al desplazamiento y la rotación previamente indicados.



**Figura 41.** Forma modal de la frecuencia obtenida del ajuste (a) Deformación en el sentido "x" negativo (b) Deformación en el sentido "x" positivo

Ahora bien, se presenta en la siguiente figura la correlación existente entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión de la mampostería para el caso del valor empleado en el ajuste,  $E_m = 932 f_m$ .



**Figura 42.** Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión de los prismas de mampostería con y sin concreto de relleno

Fuente: Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Navas, 1999; Rodríguez, 1999; modificado por el autor, 2018

El CSCR-2010 propone que el módulo de elasticidad de la mampostería se estime como  $750 f'_m$ . A modo de comparación, con respecto al valor del módulo de elasticidad empleado en la calibración del modelo, el valor indicado en el código es conservador en aproximadamente un 20%.

## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos del procesamiento de las señales registradas de las vibraciones ambientales de las viviendas en estudio. El análisis se lleva a cabo empleando el método básico en el dominio de la frecuencia y el método de descomposición en el dominio de la frecuencia.

### **4.1 Comparación entre resultados teóricos y resultados experimentales**

Se presentan a modo de comparación los resultados del análisis espectral sobre los registros de vibración ambiental medidos en las viviendas y los resultados obtenidos de la calibración del modelo estructural de dichas viviendas. Es importante indicar que de los resultados del análisis espectral, únicamente fue posible extraer información útil para los modos traslacionales de la estructura en cuestión.

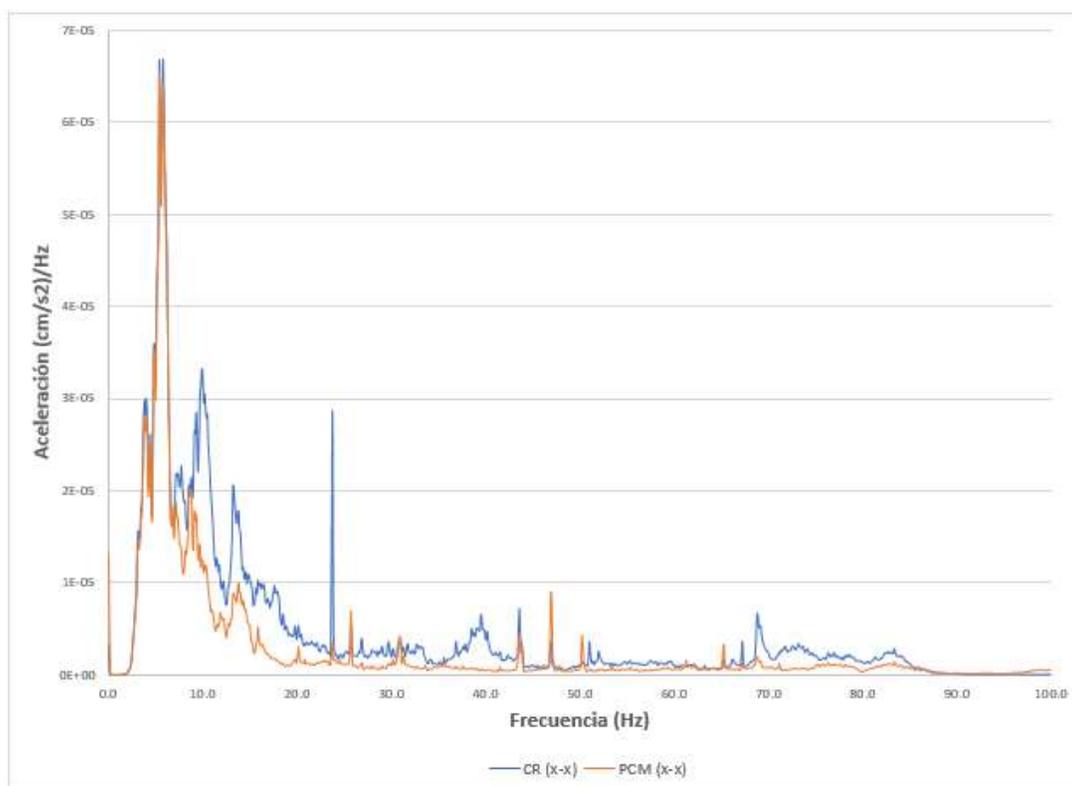
Mediante las vibraciones ambientales medidas de la prueba traslacional se determinaron los espectros de Fourier, espectros cruzados de los espectros de Fourier, y los espectros cruzados de los espectros de potencia promedio.

A partir del análisis espectral efectuado se obtuvo un valor de frecuencia natural en uno de los modos traslacionales de 15,0 Hz. Mientras tanto, el valor de la frecuencia natural asociado a la calibración del modelo estructural es de 14,7 Hz. El porcentaje de error entre ambos valores es de 2,0%. Desde el punto de vista ingenieril, un valor de porcentaje de desviación menor a un 10,0% se considera aceptable.

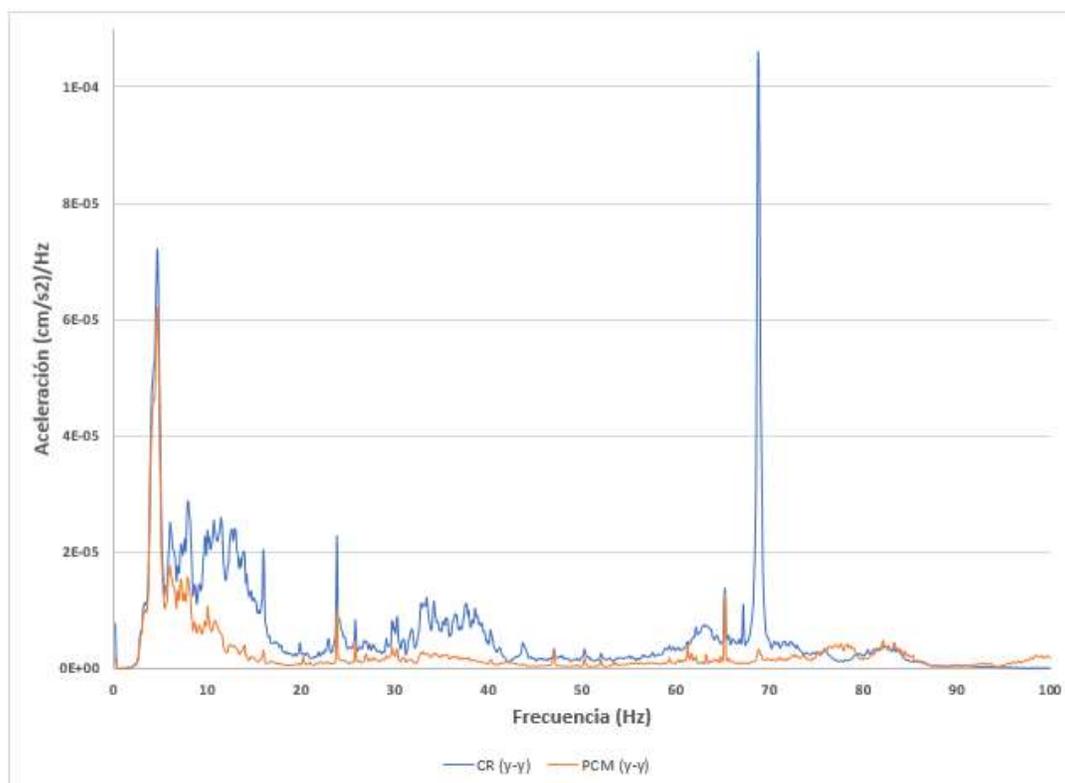
Se muestran en las siguientes figuras los autoespectros estimados a partir de las mediciones efectuadas con los Nanometrics en la vivienda 2. El pico presente en la frecuencia de 5,0 Hz en ambas direcciones tiende ligeramente hacia el valor de la frecuencia natural de la superficie donde se ubica la estructura en estudio.

De los autoespectros se observa que la mayor energía espectral se presenta en la banda de frecuencias entre 4,0 y 6,0 Hz. En general, se evidencia una mayor energía en el nivel superior de la estructura, dado que las amplitudes en este nivel son superiores a las amplitudes que experimenta la base de la estructura, lo cual es consistente con los resultados esperados del análisis espectral. La única excepción se presenta alrededor de la frecuencia de 47,0 Hz, donde se aprecia que la amplitud en la base es superior a la del nivel de entresuelo.

de la vivienda, lo cual podría estar relacionado a la actividad constructiva cercana al inmueble.



**Figura 43.** Autospectro en la dirección N-S obtenido de la prueba traslacional en la vivienda 2.



**Figura 44.** Autoespectro en la dirección E-O obtenido de la prueba traslacional en la vivienda 2.

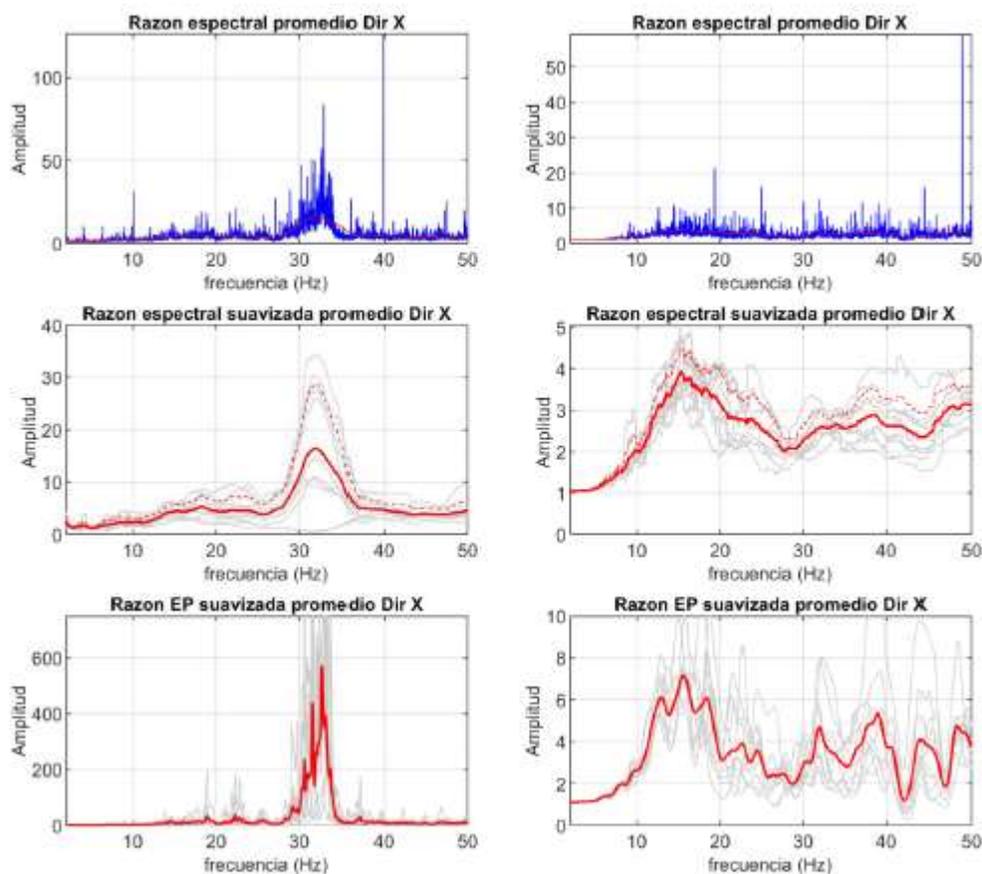
## 4.2 Comparación de los resultados obtenidos entre ambas viviendas

### 4.2.1 Comparación de M1V1 con respecto a la M1V2

A continuación, se presenta una comparación entre resultados obtenidos del procesamiento de las señales de la vivienda 1 y las señales de la vivienda 2. Primeramente, se muestran los resultados de la medición 1 en la vivienda 1, y posteriormente los resultados de la medición 2 en la vivienda 1, ambas comparados con la única medición realizada en la medición 2.

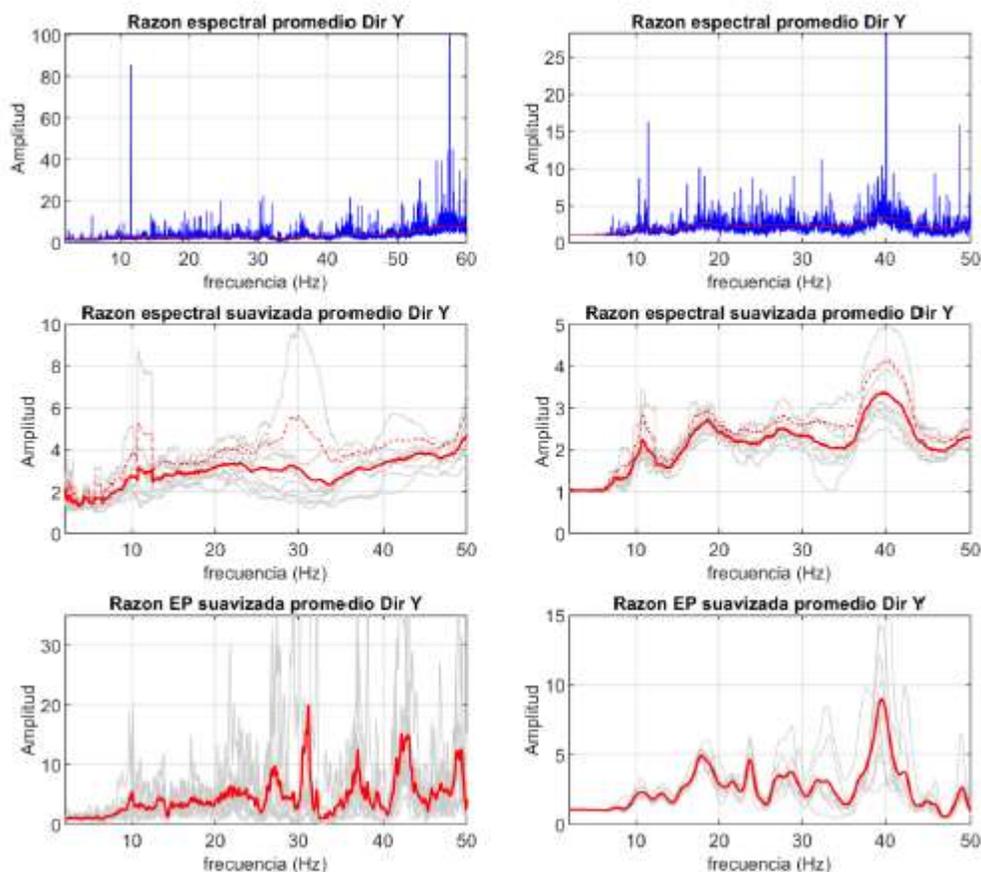
En el caso de los resultados del procesamiento de las señales de la medición 1, se observa de los gráficos una amplitud excesiva. Una de las principales causas de este comportamiento se debe a que, al momento de registrar las señales con el equipo, se presentaba un ruido constante y considerable producto de labores de construcción que se realizaban en la proximidad de la vivienda. Se maneja esta como la causa puesto que, al momento de efectuar la segunda medición se detuvieron las labores constructivas en el proyecto donde se ubica el inmueble, y como se logra apreciar de los gráficos la amplitud disminuyó significativamente en comparación a la medición 1.

Ahora bien, dada la variabilidad entre los resultados de ambas viviendas, se dificulta realizar una comparación óptima. En el caso de la medición 1 de la vivienda 1, se observa un pico aproximadamente en la frecuencia de 33,0 Hz, mientras que en la medición de la vivienda 2 se obtiene un valor aproximado de 15,0 Hz.



**Figura 45.** Comparación de razones espectrales entre M1V1 y M1V2 (Dirección x).

En la dirección del eje fuerte de la estructura, el eje más rígido de la vivienda, el análisis de los resultados obtenidos del procesamiento de las señales se torna complejo en ambas viviendas, sin embargo, en el caso de la vivienda 2 se observa una tendencia alrededor de la frecuencia de 40,0 Hz. Este valor supondría una rigidez sumamente alta de la estructura en la dirección N-S, con un periodo natural asociado de 0,025s.

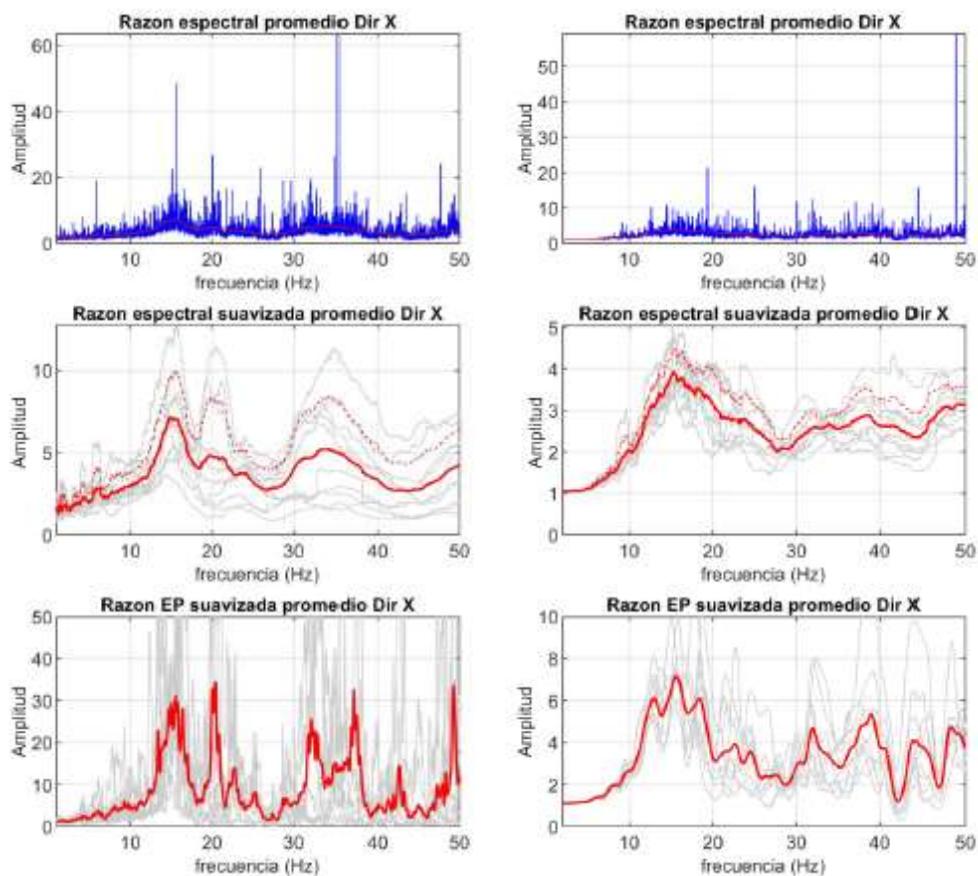


**Figura 46.** Comparación de razones espectrales entre M1V1 y M1V2 (Dirección y).

#### **4.2.2 Comparación de M2V1 con respecto a la M1V2**

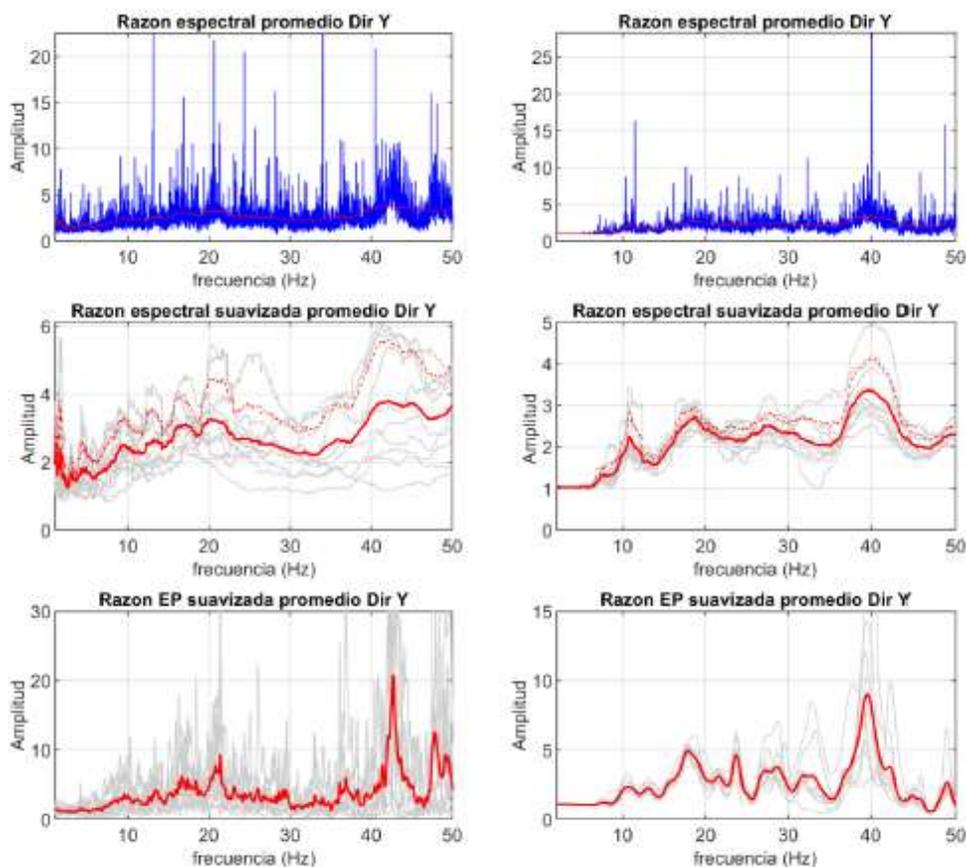
Con respecto a la segunda medición en la vivienda uno, el espectro cruzado en la dirección E-O muestra un pico en la frecuencia de 15,0 Hz, valor que como se puede observar del gráfico es respaldado por las distintas ventanas que conforman el valor promedio. Al momento de registrar la segunda medición en la vivienda uno se detuvieron los trabajos de construcción, por lo tanto, se presume que debido a este motivo se facilita la lectura en el espectro cruzado de la frecuencia de 15,0 Hz.

El espectro cruzado del espectro de potencia promedio no es concluyente en sus resultados, esto debido al exceso de picos en distintas frecuencias.



**Figura 47.** Comparación de razones espectrales entre M2V1 y M1V2 (Dirección x).

En el caso del eje más rígido de la estructura, nuevamente se observa el pico en la frecuencia de 40,0 Hz. Sin embargo, no se observa un modo claramente definido en el caso de los espectros cruzados.



**Figura 48.** Comparación de razones espectrales entre M2V1 y M1V2 (Dirección y).

### 4.3 Dificultad en la obtención de las frecuencias naturales y formas modales en estructuras muy rígidas

El ejercicio correspondiente a la identificación de las frecuencias fundamentales de las viviendas y las formas modales asociadas a dichas frecuencias presentó algunas dificultades. Entre las posibles razones se puede señalar la gran rigidez de las estructuras analizadas, las cuales están conformadas por una serie de muros de mampostería integral. Asimismo, el ruido externo a las estructuras proveniente de labores constructivas en el Proyector Avenir forma parte de la distorsión en el registro de las señales.

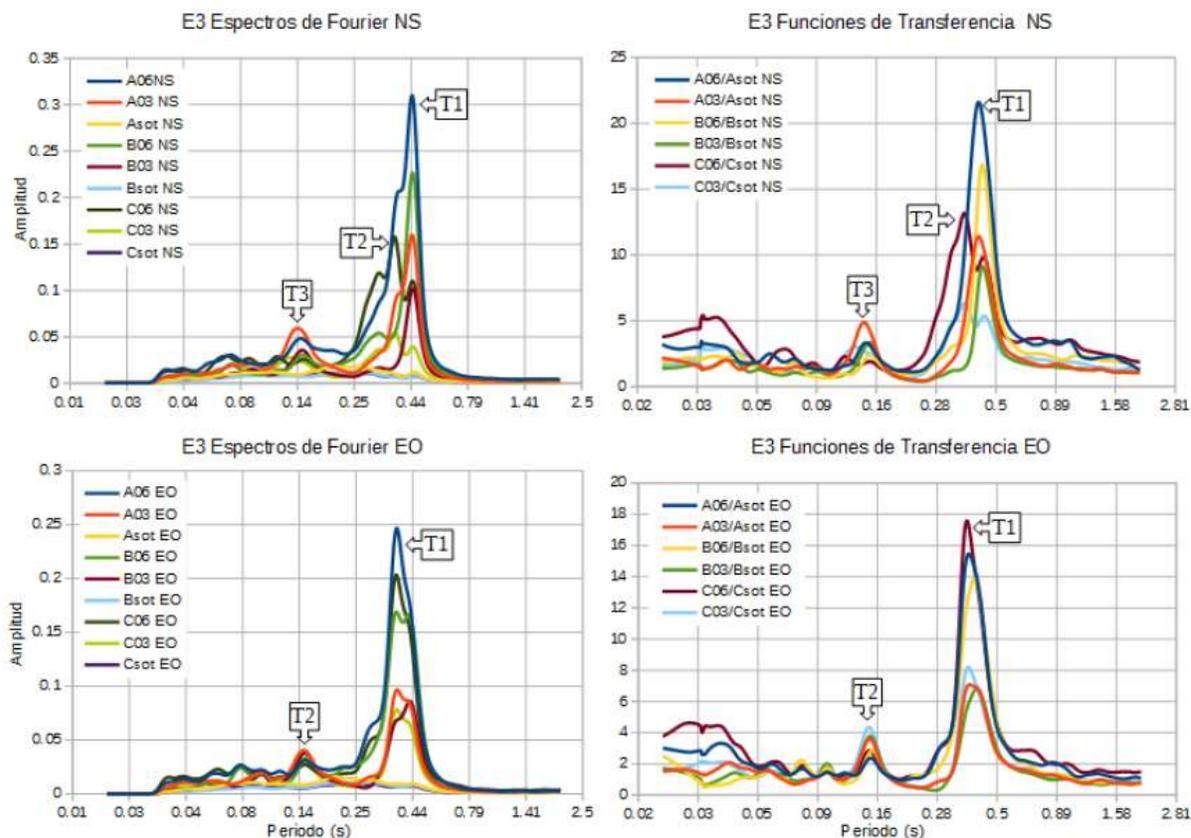
En el caso de la vivienda 1, la lectura de las frecuencias se tornó una labor confusa, donde, se da la presencia de picos marcados en valores de frecuencias altas, los cuales se pueden vincular con los equipos de construcción que se estaban empleando cerca al sitio donde se realizaron las pruebas.

Respecto a los resultados que se desprenden del tratamiento de las señales de la medición efectuada en la vivienda 2, únicamente fue posible hacer lectura de la frecuencia natural de la estructura en su eje menos rígido.

Para ambas edificaciones, se considera que la amplitud de las deformaciones registradas en los sensores no fue suficiente para obtener una respuesta dinámica de las estructuras asociadas al modo de torsión. En otras palabras, la energía proveniente de las vibraciones del entorno no es suficiente para excitar las formas modales asociadas a la torsión.

De acuerdo con Muria y González (1995), la identificación de las propiedades dinámicas en estructuras muy rígidas cimentadas en suelos arcillosos se dificulta debido a la gran deformabilidad del suelo sobre el cual se desplantan, en contraste con la pequeña deformabilidad de la estructura. Esta situación desencadena el comportamiento observado en las viviendas analizadas (desplantadas sobre suelo tipo S3, según planos), donde las estructuras se mueven prácticamente como un cuerpo rígido.

En la Figura 49 se presentan los resultados obtenidos a partir de mediciones de vibraciones ambientales efectuadas en un edificio por parte de Esquivel y Schmidt (2016). En la figura se muestran los Espectros de Fourier y las Funciones de Transferencia, tanto para la dirección NS (Norte-Sur) como para la dirección EO (Este-Oeste).



**Figura 49.** Espectros de Fourier y Funciones de Transferencia para un edificio

Fuente: Esquivel, Schmidt, 2016

En el caso de estructuras flexibles se logra visualizar con mayor claridad sus parámetros dinámicos asociados. Por ejemplo, en el caso correspondiente a estas figuras es posible identificar un total de cinco periodos naturales relacionados con modos de traslación: tres en la dirección N-S y dos en la dirección E-O. El periodo T2 solo se observa en uno de los ejes del edificio, el que se encuentra más alejado del centro de rigidez, por lo que se podría suponer que este periodo corresponde a un modo torsional.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se presentan los principales hallazgos y conclusiones de la investigación, así como también una serie de recomendaciones a considerar en el desarrollo de futuros proyectos de graduación en temas similares.

### **5.1 Conclusiones**

- Existe una mayor facilidad en la obtención de los periodos naturales de las estructuras flexibles que en el caso de las estructuras que presentan una rigidez considerable. Esto se debe a que la energía producto de las vibraciones ambientales que experimentan los edificios es mayor que en estructuras de poca altura. Se pueden considerar como desventajas del método de MVA las bajas amplitudes obtenidas del registro de señales y la complejidad para definir los mecanismos de entrada del ruido en las viviendas analizadas.
- Respecto a los resultados obtenidos de la prueba traslacional de la M1V2, mediante el procesamiento de las señales se estimó la frecuencia natural de la estructura en la dirección del eje débil en aproximadamente 15,0 Hz. Sin embargo, en la dirección del eje fuerte no fue posible identificar una forma modal asociada a la frecuencia natural de la vivienda en esta dirección. Se utiliza el valor de 15,0 Hz para calibrar el modelo con respecto a la dirección flexible de la vivienda.
- La calibración del modelo estructural se llevó a cabo variando el valor del módulo de elasticidad de la mampostería. Con un módulo de elasticidad de 143187,0 kg/cm<sup>2</sup> se obtiene una frecuencia natural en la dirección del eje flexible de la estructura de 14,7 Hz. El porcentaje de desviación entre el valor obtenido de la calibración del modelo y el valor obtenido de las MVA es de 2,0%. La recomendación del CSCR-2010 es conservadora en aproximadamente un 20%, respecto al valor del módulo de elasticidad empleado para la calibración.
- Aunque se diseñó la prueba rotacional con el fin de obtener el modo de torsión de las estructuras, de los resultados obtenidos del procesamiento de las señales en las tres mediciones realizadas, no fue posible distinguir con claridad el modo asociado al efecto de torsión. Se considera que la energía asociada a las vibraciones del ambiente que experimenta la vivienda no es suficiente para excitar el modo de torsión.

- El primer modo de vibración natural de la estructura presenta un modo totalmente desacoplado en la dirección Este-Oeste (eje débil) con una frecuencia natural cercana a los 10,0 Hz. Debido al acoplamiento entre modos, la interpretación de los modos en la dirección Norte-Sur (eje fuerte) se tornó compleja, asimismo, el valor de frecuencia natural para el modo que presentó mayor masa participativa en esta dirección se considera excesivamente alto, aproximadamente 62,0 Hz.
- Se lleva a cabo una comparación entre las mediciones tomadas en la vivienda 1, y la medición efectuada en la vivienda 2. Los resultados de la primera medición de la vivienda 1 y los obtenidos de la vivienda 2 no son comparables, lo cual se puede deber al ruido excesivo presente cuando se realizó la medición en la vivienda 1. Respecto a la comparación entre la segunda medición de la vivienda 1 y la medición en la vivienda 2, en la dirección E-O los espectros cruzados evidencian similitud con relación a la frecuencia de 15,0 Hz.
- Aunque el resultado de la medición realizada con el Lennartz (prueba H/V) no es contundente, dada la forma de su pico, si permite intuir la frecuencia natural del suelo, la cual se considera se encuentra entre los 2,5 Hz y los 3,5 Hz. Existe cercanía entre el rango de frecuencias obtenido de la prueba H/V y las bajas frecuencias observadas en los Espectros, sin embargo, no son suficientemente concluyentes para garantizar la respuesta del suelo en la estructura.
- La muestra de dos viviendas empleada en la investigación es insuficiente para dar por finalizado el estudio experimental de las propiedades dinámicas de estructura rígidas mediante el método de las vibraciones ambientales. Se considera el proyecto como un primer paso importante, sin embargo, se requiere una mayor muestra para comprobar la utilidad del método o ya sea para descartarlo completamente.

## 5.2 Recomendaciones

- Se aconseja a los administradores del proyecto donde se ubican las viviendas en estudio, en el caso que fuese posible, que posterior a algún evento sísmico de magnitud considerable se realicen pruebas similares (MVA) en las edificaciones y se estimen nuevamente las frecuencias naturales. En el caso que los valores sean inferiores a los documentados en la presente investigación, indicaría que las estructuras tienen mayor flexibilidad, lo que implicaría a su vez que se ha dado un cierto deterioro en las mismas.
- Debido a que el nivel de energía de excitación que experimentaron las viviendas producto de las vibraciones del ambiente es poco perceptible, se podría considerar para futuras mediciones en este tipo de estructuras efectuar vibraciones forzadas, de manera que la respuesta dinámica de la estructura aumente, por lo tanto, sus parámetros modales puedan distinguirse con mayor claridad.
- Para futuras mediciones de vibraciones ambientales en estructuras similares, en la medida de lo posible, se debe llevar a cabo las pruebas en lugares que no presenten construcciones cercanas. En caso de existir construcciones próximas al sitio, se recomienda planificar un día y hora de tal manera que las labores propias de la construcción no afecten las mediciones de vibraciones.
- Respecto a los equipos utilizados en las mediciones, es importante verificar que estos se encuentren debidamente calibrados, lo anterior con el objetivo de corroborar que las pruebas se estén ejecutando de la mejor manera posible.
- Se recomienda vincular cada uno de los acelerógrafos con sistemas de posicionamiento global (GPS). Emplear los GPS es una buena práctica para obtener una sincronización tal entre los equipos de manera que se garantice un registro de las señales ordenado entre los distintos acelerógrafos.
- Con el fin de poder llevar a cabo análisis estadísticos de los parámetros dinámicos estimados, se propone que la estructura a medir sea instrumentada en repetidas ocasiones en un periodo de tiempo donde no se presente algún acontecimiento que modifique las propiedades modales.

- Desde el punto de vista constructivo de las viviendas, se recomienda en la medida de lo posible evitar construir estructuras aledañas que su sistema de entrepiso se encuentren a diferentes niveles, ante un sismo esta situación podría desencadenar daños importantes.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- ASTM International. (2010). *ASTM C270-10, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2017). *ASTM C140, Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units*. West Conshohocken, PA.
- Bendat, J.S., Piersol, A.G. (1993). *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. New York: Jhon Wiley & Sons.
- Bendat, J.S., Piersol, A.G. (2010). *Random Data. Analysis and Measurements Procedures*. (4<sup>a</sup> ed.). Hoboken (NJ): Jhon Wiley & Sons.
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2001). Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, 441-445.
- Carrillo, W. (2009). Estimación de los periodos naturales de vibración de viviendas de baja altura con muros de concreto. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 19(1), pp. 39-54.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras*. México: Pearson Educación.
- CFIA. (2011). *Código Sísmico de Costa Rica 2010* (4<sup>a</sup> ed.). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Cooley, J. W. & Tukey, J. W., (1965). An algorithm for machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*, 19(90), pp. 297-301.
- Cordero, M. (2017). *Modelo estructural calibrado y análisis dinámico del Edificio Central del Instituto Costarricense de Electricidad*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Esquivel, L. (2012). *Análisis de vibraciones provocadas por la acción de caminar en entresijos de sección compuesta*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

- Esquivel, L., Schmidt, V. (2016). Metodología propuesta para ejecutar y procesar mediciones de vibraciones ambientales utilizando acelerógrafos triaxiales en edificios de concreto reforzado de menos de 100m de altura. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 21(1), 61-77.
- Ewins, D. J., (2000). *Modal testing, theory, practice and application*. (2ª ed.). Philadelphia: Research Studies Press Ltd..
- Fonseca, J., Schmidt, V. (2018). Correlación entre la forma de la razón espectral H/V con la estratigrafía del subsuelo en 10 sitios de estudio. *Revista Ingeniería*, 28(2), 1-18.
- Gómez, S. (2007). Análisis sísmico moderno: ética aplicada. México D.F.: Editorial Trillas S.A.
- Guralp. (2015). *Data sheet Guralp 5TDE: Network-Ready Digital Force-Balance Accelerometer*.
- Henao, D. (2013). Identificación de las propiedades dinámicas de una estructura sometida a vibración ambiental empleando análisis espectral. Proyecto de grado para optar por el grado de Magister en Ingeniería, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Incorporated Research Institutions for Seismology. (2017). *Seismic Analysis Code Users Manual*. Extraído el 7 de setiembre, 2017 de [http://ds.iris.edu/files/sac-manual/sac\\_manual.pdf](http://ds.iris.edu/files/sac-manual/sac_manual.pdf).
- Innovative Geophysical Solutions. (2015). Acelerógrafo Titan SMA. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de <https://www.osop.com.pa/el-titan-sma-de-osop-esta-en-lina/>
- Hibbeler, R. (2010). Ingeniería mecánica estática (12ª edición). México D.F.: Person Educación
- Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., & Cattari, S. (2013). TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures*, 56, 1787-1799.
- MathWorks. (2018). Matlab (R2018b) [software]. Obtenido de <https://www.mathworks.com/>.

- Mendoza, R. (2007). Evaluación de métodos para estimar la excentricidad de estructuras a partir de pruebas dinámicas. Proyecto de graduación para optar por el grado de Maestro en Ingeniería, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Muriá Vila, D. (2007). Experiencia mexicana sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados. México D.F.: ai México.
- Murray, T. (2000). *Floor Vibration Testing and Analysis of Smartbeam Floors in Parking Garages in Atlanta and Office Building in Arkansas*. Estados Unidos de América: CMC Steel Group.
- Nakamura, Y. (1989). A method of dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quart. Rep. Railways Tech. Res. Inst*, 30, 25-33.
- Navas, A. (2007). Propiedades a compresión de la mampostería de bloques de concreto. *Ingeniería*, 17(2), 53-70.
- Poveda, A. (2017). Notas del curso: Estructuras de mampostería. Universidad de Costa Rica, II-2017.
- SeismoSoft Ltda. (2017). *SeismoStruct 2016*. Extraído el 7 de setiembre, 2017 de <http://www.seismosoft.com/>.
- Structural Vibration Solutions. (2018). ARTeMIS Modal [software]. Obtenido del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica.
- Tejada, C. (2011). Análisis dinámico de estructuras en el dominio de la frecuencia. *Trabajo de Investigación Tutelado*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Wikipedia. (2018). Transformada de Fourier. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de [https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada\\_de\\_Fourier](https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier)

## APÉNDICE A: CÁLCULOS DE CENTROS DE MASAS, CENTROS DE RIGIDEZ Y EXCENRICIDADES

Se presentan los resultados de las estimaciones del centro de masa y del centro de rigidez de la estructura, esto de acuerdo con lo que dicta el CSCR-2010. Para elementos rectangulares, como el caso de los muros y columnas de la vivienda, la inercia con respecto a cada eje se determina como:

$$I_{xx} = \frac{1}{12}xy^3 \quad [Ec. 22]$$

$$I_{yy} = \frac{1}{12}yx^3 \quad [Ec. 23]$$

Ahora bien, la rigidez lateral de los elementos se estima mediante la expresión:

$$k_{xx} = \frac{12}{h^3}EI_{yy} \quad [Ec. 24]$$

$$k_{yy} = \frac{12}{h^3}EI_{xx} \quad [Ec. 25]$$

**Cuadro A1.** Cálculo del centro de rigidez en dirección de los ejes longitudinales (eje x).

Nivel	Etiqueta	t (m)	L (m)	H (m)	f'm ó f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )	G (kg/cm <sup>2</sup> )	x (m)	A <sub>e</sub> (m <sup>2</sup> )	I <sub>e</sub> (m <sup>4</sup> )	k (Ton/m)	x*k (Ton)
Primer nivel	ML-1	0.12	0.4	2.32	100	75000	30000	3.8	0.02	0.001	461	1753
	ML-2	0.12	8.52	2.32	100	75000	30000	8.26	0.51	6.185	4457561	36819458
	ML-3	0.12	0.4	2.32	100	75000	30000	3.8	0.02	0.001	461	1753
	ML-4	0.12	8.52	2.32	100	75000	30000	8.26	0.51	6.185	4457561	36819458
	C-1	0.15	0.6	2.32	210	218820	87527.92	0.8	0.05	0.003	5678	4542
	C-2	0.15	0.6	2.32	210	218820	87527.92	0.8	0.05	0.003	5678	4542
Segundo nivel	ML-1	0.12	10.12	2.4	100	75000	30000.00	5.06	0.61	10.364	6747615	34142934
	ML-2	0.12	3.59	2.4	100	75000	30000.00	8.325	0.22	0.463	301226	2507705
	ML-3	0.12	0.53	2.4	100	75000	30000.00	0.385	0.03	0.001	969	373
	ML-4	0.12	1.59	2.4	100	75000	30000.00	2.255	0.10	0.040	26170	59013
	ML-5	0.12	1.86	2.4	100	75000	30000.00	4.79	0.11	0.064	41894	200670
	ML-6	0.12	9.72	2.4	100	75000	30000.00	5.26	0.5832	9.183	5978711	31448021
										Σ	22023986	142010221
										X <sub>cr</sub> (m)	6.45	

**Cuadro A2.** Cálculo del centro de rigidez en dirección de los ejes transversales (eje y).

Nivel	Etiqueta	t (m)	L (m)	H (m)	f'm ó f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )	G (kg/cm <sup>2</sup> )	y (m)	A (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	k (Ton/m)	y*k (Ton)
Primer nivel	MT-1	0.12	1.45	2.32	100	75000	30000	0.725	0.09	0.030	21973	15930
	MT-2	0.12	1.19	2.32	100	75000	30000	0.595	0.07	0.017	12146	7227
	MT-3	0.12	1.19	2.32	100	75000	30000	4.725	0.07	0.017	12146	57388
	MT-4	0.12	0.92	2.32	100	75000	30000	6.59	0.06	0.008	5612	36985
	MT-5	0.12	0.92	2.32	100	75000	30000	4.59	0.06	0.008	5612	25761
	MT-6	0.12	1.05	2.32	100	75000	30000	6.522	0.06	0.012	8343	54416
	MT-7	0.12	1.19	2.32	100	75000	30000	6.465	0.07	0.017	12146	78521
	C-3	0.28	0.3	2.32	210	218819.7889	87527.9155	0.15	0.04	0.001	1325	199
C-4	0.28	0.3	2.32	210	218819.7889	87527.9155	6.9	0.04	0.001	1325	9141	
Segundo nivel	MT-1	0.12	0.39	2.4	100	75000	30000	0.195	0.02	0.001	386	75
	MT-2	0.12	1.72	2.4	100	75000	30000	1.66	0.10	0.051	33128	54992
	MT-3	0.12	2.79	2.4	100	75000	30000	1.395	0.17	0.217	141391	197240
	MT-4	0.12	0.65	2.4	100	75000	30000	0.325	0.04	0.003	1788	581
	MT-5	0.12	1.19	2.4	100	75000	30000	0.595	0.07	0.017	10971	6528
	MT-6	0.12	0.52	2.4	100	75000	30000	4.39	0.03	0.001	915	4019
	MT-7	0.12	0.92	2.4	100	75000	30000	4.2	0.06	0.008	5070	21292
	MT-8	0.12	1.72	2.4	100	75000	30000	3.53	0.10	0.051	33128	116942
	MT-9	0.12	0.53	2.4	100	75000	30000	4.915	0.03	0.001	969	4764
	MT-10	0.12	0.65	2.4	100	75000	30000	6.725	0.04	0.003	1788	12024
	MT-11	0.12	0.81	2.4	100	75000	30000	5.055	0.05	0.005	3460	17490
	MT-12	0.12	1.59	2.4	100	75000	30000	6.255	0.10	0.040	26170	163692
	MT-13	0.12	2.52	2.4	100	75000	30000	5.85	0.15	0.160	104186	609490
	MT-14	0.12	2.52	2.4	100	75000	30000	5.85	0.15	0.160	104186	609490
	MT-15	0.12	1.19	2.4	100	75000	30000	6.455	0.07	0.017	10971	70818
<b>Σ</b>											<b>559135</b>	<b>2175004</b>
<b>Ycr (m)</b>											<b>3.89</b>	

Se muestran en los Cuadros A3 y A4 los resultados asociados al cálculo del centro de masa en los muros de la vivienda.

**Cuadro A3.** Cálculo del centro de masa en muros del primer nivel.

Etiqueta	L (m)	W (Ton)	x (m)	y (m)	Wx (ton-m)	Wy (ton-m)
ML-1	0.4	0.13	3.8	1.39	0.48	0.17
ML-2	8.52	2.67	8.26	0.06	22.05	0.16
ML-3	0.4	0.13	3.8	2.86	0.48	0.36
ML-4	8.52	2.67	8.26	6.99	22.05	18.66
C-1	0.6	0.24	0.8	0.490	0.19	0.12
C-2	0.6	0.24	0.8	6.56	0.19	1.54
MT-1	1.45	0.45	4.06	0.725	1.84	0.33
MT-2	1.19	0.37	12.46	0.595	4.65	0.22
MT-3	1.19	0.37	4.06	4.725	1.51	1.76
MT-4	0.92	0.29	4.06	6.59	1.17	1.90
MT-5	0.92	0.29	5.93	4.59	1.71	1.32
MT-6	1.05	0.33	5.93	6.522	1.95	2.15
MT-7	1.19	0.37	12.46	6.465	4.65	2.41
C-3	0.3	0.09	10	0.15	0.94	0.01
C-4	0.3	0.09	10	6.9	0.94	0.65
<b>Σ</b>		<b>8.73</b>			<b>64.79</b>	<b>31.77</b>

**Cuadro A4.** Cálculo del centro de masa en muros del segundo nivel.

Etiqueta	L (m)	W (ton)	x (m)	y (m)	Wx (ton-m)	Wy (ton-m)
ML-1	10.12	6.13	5.06	0.06	31.03	0.37
ML-2	3.59	4.27	8.33	3.53	35.57	15.08
ML-3	0.53	0.63	0.39	4.59	0.24	2.89
ML-4	1.59	1.89	2.26	4.59	4.27	8.68
ML-5	1.86	2.21	4.79	4.59	10.60	10.16
ML-6	9.72	11.57	5.26	6.99	60.84	80.85
MT-1	0.39	0.46	0.06	0.20	0.03	0.09
MT-2	1.72	2.05	0.06	1.66	0.12	3.40
MT-3	2.79	3.32	4.06	1.40	13.48	4.63
MT-4	0.65	0.77	6.59	0.33	5.10	0.25
MT-5	1.19	1.42	10.06	0.60	14.25	0.84
MT-6	0.52	0.62	0.06	4.39	0.04	2.72
MT-7	0.92	1.09	4.06	4.20	4.44	4.60
MT-8	1.72	2.05	10.06	3.53	20.59	7.23
MT-9	0.53	0.63	0.46	4.92	0.29	3.10
MT-10	0.65	0.77	0.46	6.73	0.36	5.20
MT-11	0.81	0.96	2.72	5.06	2.62	4.87
MT-12	1.59	1.89	2.99	6.26	5.66	11.84
MT-13	2.52	3.00	4.99	5.85	14.96	17.54
MT-14	2.52	3.00	6.59	5.85	19.76	17.54
MT-15	1.19	1.42	10.06	6.46	14.25	9.14
$\Sigma$		<b>50.2</b>			<b>258.5</b>	<b>211.0</b>

Las cargas de diseño que se consideraron en el sistema de entrepiso se presentan en el siguiente cuadro:

**Cuadro A5.** Cargas de diseño consideradas en el sistema de entrepiso.

Elemento	W (kg/m <sup>2</sup> )
Cerámica	50
Acabado de cielos	15
Instalaciones electromecánicas	10
Divisiones livianas	80
Peso propio	310
15% Carga temporal	30
<b>Total</b>	<b>495</b>

Posteriormente, se obtiene la carga distribuida en toda el área, la cual se estima a partir del dato del Cuadro A4 multiplicada por el área total del entrepiso:

$$W_{entrepiso} = \frac{495 \cdot 51,23}{1000} = 25,36 \text{ ton}$$

Con respecto a la estructura de techo, las cargas de diseño se conforman por 40 kg/m<sup>2</sup> de carga permanente y 40 kg/m<sup>2</sup> de carga temporal. Similar al caso del entrepiso, se multiplica por el área de techo para obtener la carga distribuida total:

$$W_{techo} = \frac{80 \cdot 74,62}{1000} = 5,97 \text{ ton}$$

En el Cuadro A6 se muestra el resumen de los distintos elementos con las cargas asociadas a cada uno de estos y sus respectivos centroides en ambas direcciones. Finalmente, se realiza el cálculo del centro de masa de la estructura.

**Cuadro A6.** Cálculo del centro de masa de la estructura.

Elemento	W (ton)	X (m)	Y (m)	WX (ton-m)	WY (ton-m)
Muros primer nivel	8.73	7.42	3.64	64.79	31.77
Muros segundo nivel	50.16	5.15	4.21	258.49	211.03
Sistema de entrepiso	25.36	6.26	3.53	158.75	89.39
Estructura de techo	5.97	5.36	3.53	32.00	21.04
$\Sigma$	90.22			514.03	353.23
				<b>Xcm (m)</b>	<b>5.70</b>
				<b>Ycm (m)</b>	<b>3.92</b>

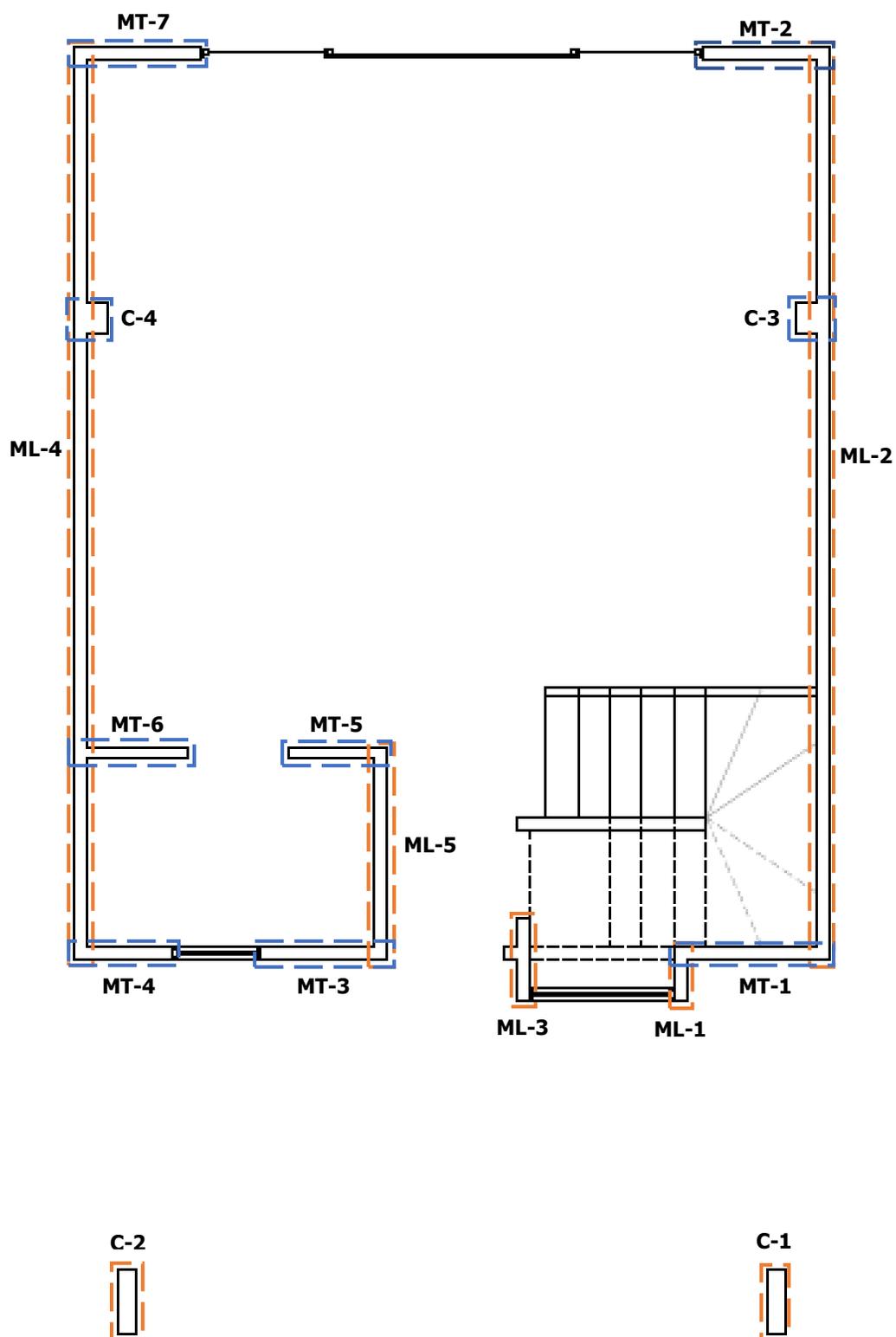
El cálculo de las excentricidades se obtiene mediante las expresiones matemáticas:

$$e_x = X_{cr} - X_{cm} \quad [Ec. 26]$$

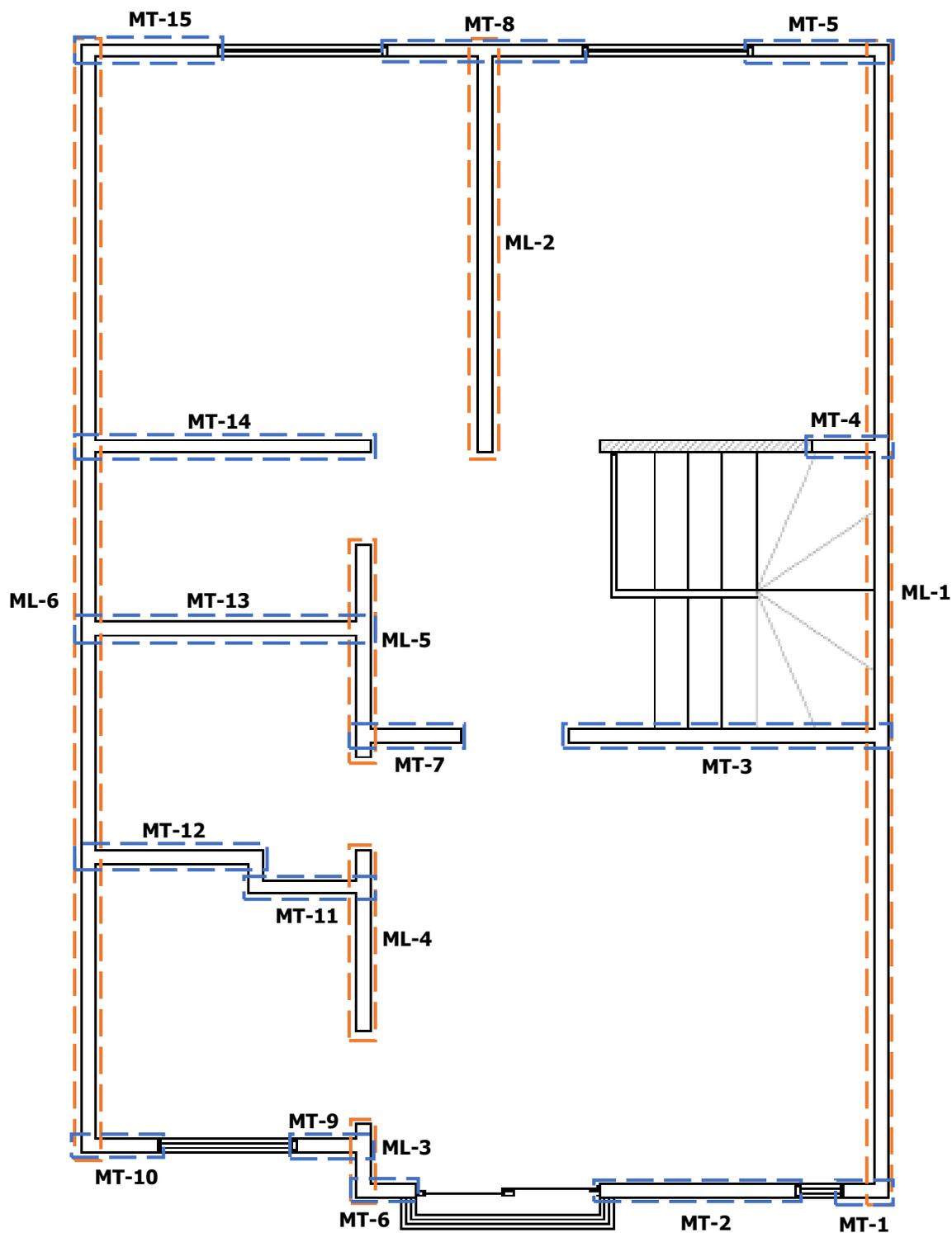
$$e_y = Y_{cr} - Y_{cm} \quad [Ec. 27]$$

**Cuadro A7.** Excentricidad y tipo de regularidad de la vivienda.

Centro de masa (m)		Centro de rigidez (m)		Excentricidad		Dimensión en planta (m)		e/D (%)	Tipo de regularidad
X <sub>CM</sub>	5,71	X <sub>CR</sub>	6,45	e <sub>x</sub>	0,74	D <sub>x</sub>	12,52	5,9	Irregular moderada
Y <sub>CM</sub>	3,93	Y <sub>CR</sub>	3,89	e <sub>y</sub>	0,04	D <sub>y</sub>	7,05	0,5	



**Figura A.1** Distribución de paredes en el Nivel 1 de la vivienda.



**Figura A.2** Distribución de paredes en el Nivel 2 de la vivienda.

## APÉNDICE B: PROGRAMACIÓN PARA OBTENCIÓN DE TRANSFORMADA DE FOURIER Y ESPECTROS CRUZADOS

Se presenta el algoritmo utilizado para la obtención de la Transformada de Fourier de los distintos sensores y los espectros cruzados con el programa Matlab.

Como primer paso, los datos son guardados en un archivo de extensión “.mat”. Este tipo de archivo se genera al importar un archivo “.txt” o “.csv” como una matriz a Matlab y guardándolo desde el espacio de trabajo con el tipo de formato mencionado. Esta matriz debe tener los datos de aceleración por cada sensor, preferiblemente en columnas. Los archivos se cargan de la siguiente manera:

```
load('acc_CR.mat');
load('acc_PCM.mat');
```

Posteriormente, se selecciona la dirección de análisis. La dirección *y* es aquella paralela al eje fuerte de la estructura, y la dirección *x* es la paralela al eje débil.

```
DA='Y';                                     Se cambia aquí según sea el caso de análisis
if DA=='X'
    y_acel_01=acc_CR(:,1);
    y_acel_02=acc_PCM(:,1);
else
    y_acel_01=acc_CR(:,2);
    y_acel_02=acc_PCM(:,2);
end
```

Ahora bien, se definen los parámetros de entrada:

```
npt=length(y_acel_01);
dt=1/1000;
tiempo_acel=(0:npt-1)*dt;
x_acel=tiempo_acel;
ti=500;
delta_t=80;
```

Adicionalmente, se aplica un ventaneo en el dominio del tiempo (Ventana de Tukey) para evitar inconvenientes de rizado en las transformadas de FFT.

```
for h=1:10
    npt2=length(y_acel_01(ti/dt:(ti+delta_t)/dt,1));
    ventana=tukeywin(npt2,0.05);
    y_acel_corr_01=y_acel_01(ti/dt:(ti+delta_t)/dt,1).*ventana;
    y_acel_corr_02=y_acel_02(ti/dt:(ti+delta_t)/dt,1).*ventana;
    x_acel_corr=x_acel(ti/dt:(ti+delta_t)/dt);
```

Seguidamente, se presenta el algoritmo para la estimación de las Transformadas de Fourier, determinando la amplitud y la fase.

```
afou_01=fft(y_acel_corr_01);
afou_02=fft(y_acel_corr_02);
famp_01=abs(afou_01)*dt;
famp_02=abs(afou_02)*dt;
%se multiplica por dt debido a que queda fuera de la sumatoria
ffase_01=angle(afou_01)*180/pi;
ffase_02=angle(afou_02)*180/pi;
df=1./(dt*npt2); % intervalo de muestreo frecuencial
% diferencial de frecuencia de acuerdo con el periodo total de la señal
freq=0:npt2-1;
freq=freq'*df;
y_acel_fft_01=famp_01;
y_acel_fft_02=famp_02;
```

Las funciones de Potencial Espectral se calcularon de la siguiente manera:

```
leakage=0.5;
[PS_01, Freq_PS_01] = pspectrum(y_acel_corr_01,1/dt, ...
'FrequencyLimits',[0 100], ...
'Leakage',leakage);
[PS_02, Freq_PS_02] = pspectrum(y_acel_corr_02,1/dt, ...
'FrequencyLimits',[0 100], ...
'Leakage',leakage);
PS_01_02=PS_01./PS_02;
PS_e(:,h)=PS_01_02;
```

Respecto a la Razón Espectral Promedio, la estimación se realizó a partir del siguiente algoritmo:

```
ra_e_media=mean(ra_e,2);
% ra_e_media_s=esmfthf(ra_e_media,x_02,length(x_02),0.1);
ra_es_media=mean(ra_es,2);
ra_es_std=std(ra_es');
% ra_es_menos=ra_es_media-ra_es_std';
ra_es_mas=ra_es_media+ra_es_std';
```