

**ANÁLISIS DE DAÑO EN ESTRUCTURA DE CONCRETO A PARTIR DE LA
VARIACIÓN DE SUS PROPIEDADES DINÁMICAS**

**DANIELA AFANADOR BELTRÁN
ANDREA JULIANA GUTIÉRREZ GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2018**

**ANÁLISIS DE DAÑO EN ESTRUCTURA DE CONCRETO A PARTIR DE LA
VARIACIÓN DE SUS PROPIEDADES DINÁMICAS**

**DANIELA AFANADOR BELTRÁN
ANDREA JULIANA GUTIÉRREZ GÓMEZ**

Trabajo de grado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Civil

Director:

ÁLVARO VIVIESCAS JAIMES

Ingeniero Civil. Ph D

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A Dios por la vida y la oportunidad.

A mis padres por su amor, confianza, esfuerzo y apoyo incondicional.

A mi familia que siempre ha estado presente.

A mi compañera de tesis porque juntas lo logramos.

A mis amigos, gracias por acompañarme en el camino.

A todos quienes han contribuido en este proceso.

Gracias

Daniela Afanador Beltrán

DEDICATORIA

*“Nada en nosotros es Original, Somos el esfuerzo combinado,
De todas las personas que hemos conocido”*

A mi familia por ser el pilar en mi vida y su constante fe en mí

A mi compañera de tesis, por ser el mejor equipo de trabajo

A mis amigos, por su apoyo constante en cada paso

A cada persona que aportó algo de su esfuerzo para que este sueño se hiciera posible

Andrea Juliana Gutiérrez Gómez

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	17
1.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. METODOLOGÍA.....	18
2.1. CASO DE ESTUDIO.....	18
2.1.1. Documentación existente.....	19
2.1.2. Descripción de la estructura	19
2.1.3. Definición de materiales.....	21
2.2. ELABORACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	22
2.2.1. Masa	23
2.2.2. Condiciones de frontera.....	23
2.2.3. Generación de los elementos estructurales y otras hipótesis	24
2.2.4. Análisis modal.....	25
2.2.4.1 Periodos y frecuencias naturales	26
2.2.4.2 Modos naturales de vibración	26
2.3. CAMPAÑAS EXPERIMENTALES	28
2.3.1. Equipo de adquisición de datos	28
2.3.2. Ventanas de muestreo.....	29
2.3.3. Configuración en altura.....	29
2.3.4. Configuración en planta	31
2.3.5. Procesamiento de señales.....	33

2.3.5.1	Obtención y tratamiento de registros	33
2.3.5.2	Identificación de frecuencias naturales	34
2.3.5.3	Identificación de formas modales	37
2.3.6.	Estimación de los porcentajes de amortiguamiento.....	40
2.4.	COMPARACIÓN DE PARÁMETROS MODALES	41
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
4.	CONCLUSIONES.....	46
	REFERENCIAS	49
	BIBLIOGRAFÍA.....	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del concreto.....	22
Tabla 2. Cargas.	23
Tabla 3. Propiedades dinámicas del modelo empotrado.	26
Tabla 4. Propiedades dinámicas del modelo con resortes.....	26
Tabla 5. Parámetros dinámicos en dirección Y.....	35
Tabla 6. Parámetros dinámicos en dirección X.....	36
Tabla 7. Parámetros dinámicos correspondientes a las formas modales.	38
Tabla 8. Índice MAC, entre formas modales obtenidas en Midas y en pruebas de vibración ambiental.	41
Tabla 9. Propiedades dinámicas del modelo ajustado.....	43
Tabla 10. Índice MAC, entre formas modales obtenidas en Midas ajustado y en pruebas de vibración ambiental.	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Edificio Centro Caracterización de Materiales de Construcción.	18
Figura 2. (a) Placa estructural planta 1; (b) Placa estructural planta 2; (c) Placa estructural planta 3.	20
Figura 3. Modelo analítico para la estructura del caso de estudio.	22
Figura 4. Empotramiento como condición de apoyo.	23
Figura 5. Resortes en condición de apoyo.	24
Figura 6. Modelo placa 2.	25
Figura 7. Primeros modos de vibración obtenidos del modelo teórico. (a) Modo TRAN-X [modelo empotrado]; (b) Modo TRAN-Y [modelo empotrado]; (c) Modo TRAN-X [modelo con resortes]; (d) Modo TRAN-Y [modelo con resortes].	26
Figura 8. Acelerógrafo Obsidian.	28
Figura 9. Configuración ejes independientes.	30
Figura 10. Configuraciones para los ejes acoplados.	31
Figura 11. Configuración en planta ejes independientes.	32
Figura 12. Configuración en planta ejes acoplados.	32
Figura 13. Espectro de densidad de valores singulares para el eje 2.	34
Figura 14. Movimiento del EJE 2 dirección Y (T=0.142s).	35
Figura 15. Movimiento del EJE 2 dirección X (T=0.220s).	36
Figura 16. Espectro de densidad de valores singulares para la configuración acoplada.	37
Figura 17. Modo 1, traslacional en dirección X (T=0.2311s).	38
Figura 18. Modo 2, traslacional en dirección Y (T=0.1450s).	38
Figura 19. Modo de Vibración 1, en dirección X (T=0.2311s).	39
Figura 20. Modo de Vibración 2, en dirección Y (T=0.1450s).	39
Figura 21. Estimación del porcentaje de amortiguamiento para el modo 1 (T=0.2311s).	40
Figura 22. Modelo 3D ajustado.	42

Figura 23. Modo de Vibración 1, modelo ajustado, en dirección X ($T=0.2311s$)....43
Figura 24. Modo de vibración 2, modelo ajustado, en dirección Y ($T=0.1450$).44

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

Anexo A. Planos estructurales de Edificio Centro Caracterización de Materiales de Construcción.

Anexo B. Estudio de suelos.

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE DAÑO EN ESTRUCTURA DE CONCRETO A PARTIR DE LA VARIACIÓN DE SUS PROPIEDADES DINÁMICAS*

AUTORES: DANIELA AFANADOR BELTRÁN
ANDREA JULIANA GUTIÉRREZ GÓMEZ**

PALABRAS CLAVE: Daño estructural, Pruebas de vibración ambiental, Formas modales, Valores propios, Criterios de correlación modal.

En este documento se presenta el resultado obtenido del análisis de la posible presencia de daño estructural en una edificación de concreto reforzado, por medio de pruebas de vibración ambiental (AVT por sus siglas en inglés), siendo las pruebas de vibración ambiental una técnica no destructiva de detección de daño. Se realizaron pruebas de vibración ambiental y a partir de las señales de aceleración obtenidas fue posible identificar algunas frecuencias y formas modales fundamentales que presenta la estructura. Estas señales fueron procesadas empleando el software ARTeMIS Modal Pro® [1], con el método mejorado de descomposición en el dominio de la frecuencia (EFDD por sus siglas en inglés). Para obtener los parámetros dinámicos teóricos de la estructura se elaboró un modelo numérico de elementos finitos en el software Midas Gen® [2], sobre el cual se realizó un análisis de valores propios. Los resultados muestran una buena correlación luego de aplicado el índice de correlación modal (MAC por sus siglas en inglés) entre las formas modales obtenidas (numéricas y experimentales), Esto permitió comparar las frecuencias naturales en busca de posible daño, como resultado debido al incremento de los valores de frecuencia en las pruebas de vibración ambiental no fue posible determinar de manera contundente la presencia daño estructural.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes.

ABSTRACT

TITLE: **DAMAGE ANALYSIS IN CONCRETE STRUCTURE FROM THE VARIATION OF ITS DYNAMICS PROPERTIES***

AUTHORS: **DANIELA AFANADOR BELTRÁN**
 ANDREA JULIANA GUTIÉRREZ GÓMEZ**

KEYWORDS: Structural damage, Ambient vibration tests, Mode shapes, Eigenvalue, Modal assurance criterion.

This document presents the result obtained from the analysis of the possible presence of structural damage in a concrete building, through ambient vibration tests, being the ambient vibration tests a non-destructive technique. Ambient Vibration Tests (AVT) were done. From the signals of acceleration obtained was possible the identification of the fundamental modal forms presented in the structure. These signals were processed using the ARTeMIS Modal Pro® [1] software, with the Enhanced Frequency Domain Decomposition method (EFDD). To obtain the theoretical dynamic parameters of the structure, a numerical finite elements model was developed in the Midas Gen® [2] software, on which an analysis of Eigenvalue was carried out. Results evidence good correlation with the modal assurance criterion (MAC) index between the modal forms, This allowed us to compare the natural frequencies in search of possible damage and according increase of the frequency values in the Ambient Vibration Tests, it was not possible to conclusively determine the presence of structural damage.

.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes.

INTRODUCCIÓN

Debido a la preocupación que genera el estado actual de las estructuras en concreto existentes; alrededor del mundo se ha realizado en los últimos años gran cantidad de investigaciones encaminadas en el área de técnicas no destructivas de detección de daño estructural (NDT). Entre estas técnicas se encuentran los métodos de inspección basados en observación, pruebas de carga, pruebas de vibración, detección ultrasónica, conductividad eléctrica, y radar, cada uno con sus respectivas ventajas y desventajas [3].

De acuerdo con esto y apoyados en las ventajas que presentan los métodos basados en vibraciones, principalmente el poder realizar las pruebas mientras la estructura se encuentra en servicio, así como la disponibilidad de los equipos en el Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME), se seleccionó esta técnica para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto. A través de pruebas de vibración es posible la identificación de propiedades dinámicas de las estructuras; existen tres metodologías que se pueden llevar a cabo: pruebas forzadas, sísmicas y de vibración ambiental [4]. Son estas últimas la base del estudio de esta investigación.

En relación a esto se decide aplicar este tipo de metodologías a una edificación de interés con el fin de ampliar el conocimiento de esta temática en la región, en la cual no se tiene evidencia en la literatura que se cuente con investigaciones sobre análisis y posible detección de daño basados en pruebas de vibración ambiental.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Identificar el daño en estructuras de concreto reforzado mediante la utilización de métodos no destructivos (NDT) basados en la variación en sus propiedades dinámicas.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar el comportamiento dinámico del Centro Caracterización de Materiales de Construcción, utilizando un modelo de elementos finitos.

Obtener las propiedades dinámicas de la estructura bajo estudio (Centro Caracterización de Materiales de Construcción), a partir de pruebas de vibración ambiental.

Diagnosticar la existencia de daño estructural a partir de la variación en las propiedades dinámicas.

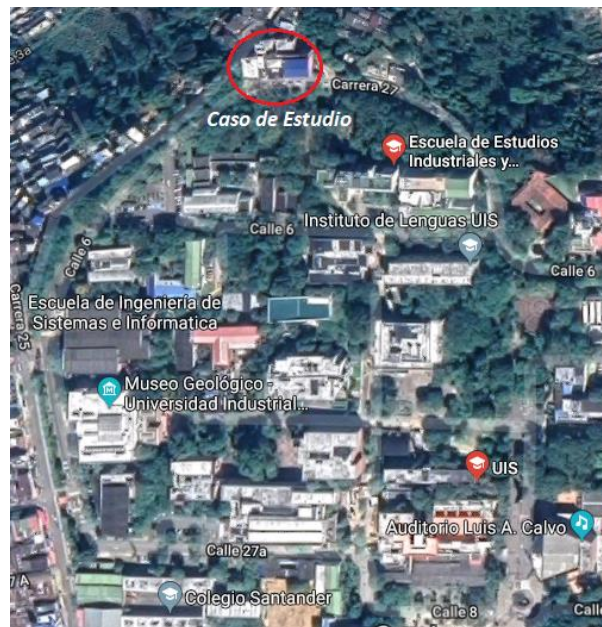
2. METODOLOGÍA

2.1. CASO DE ESTUDIO

Se selecciona el edificio Centro Caracterización de Materiales de Construcción, ubicado dentro del campus principal de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, como caso de estudio. Se presume, debido a la observación la posible existencia de daño en la estructura.

En la actualidad funciona como edificio de ingenierías de la UIS, prestando servicio como laboratorio de caracterización de materiales, docencia y oficinas de profesores.

Figura 1. Ubicación Edificio Centro Caracterización de Materiales de Construcción.



Fuente: Google Maps.

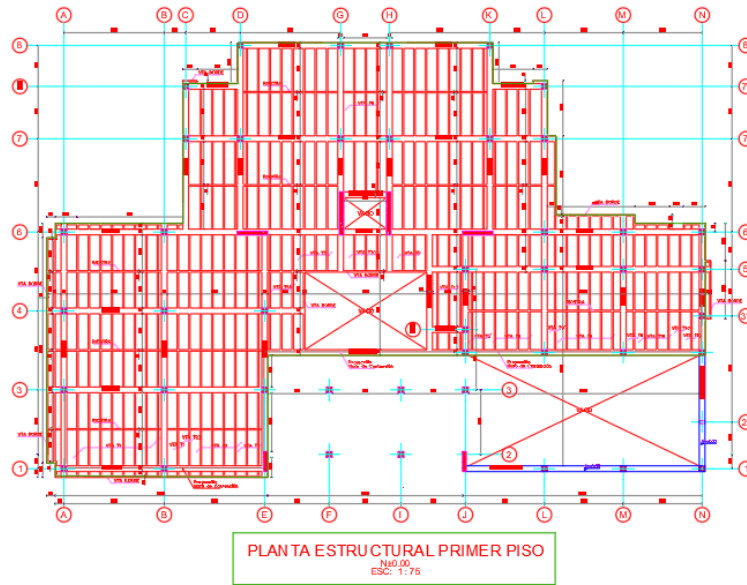
2.1.1. Documentación existente Los planos estructurales (Anexo A) y un estudio de suelos (Anexo B) realizado en el año 1998 son proporcionados por la División de Planta Física de la Universidad Industrial de Santander. No obstante, no se encuentra documentación acerca del estudio de materiales y/o memorias de cálculo.

2.1.2. Descripción de la estructura El Edificio fue diseñado bajo la norma NSR-98 [5] y construido hacia el año 2006. Según la norma NSR-10 [6] se encuentra dentro del grupo III de importancia (Edificación de atención a la comunidad).

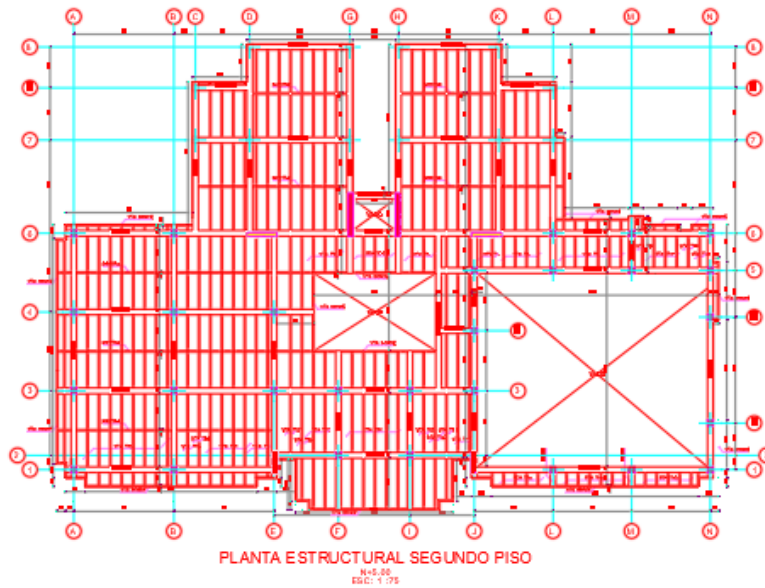
Es una estructura de tres niveles y 13 m de altura total, cimentada sobre zapatas, diseñada con un sistema estructural de pórticos y muros de concreto reforzado.

La estructura cuenta con 9 ejes de columnas tanto en la dirección Norte-Sur como en la dirección Este-Oeste. Todas las columnas tienen una dimensión de 0.4x 0.4m. Las vigas tienen una sección de 0.4x0.4m, posee un sistema de placa aligerada, con viguetas de 0.1x0.4m con una separación entre ellas de 0.8m. La placa dos y tres cuentan con un vacío de dimensión considerable al lado este de la estructura, este vacío es debido a que allí se encuentra el muro de reacción y el puente grúa del laboratorio de estructuras. En la Figura 2 se presentan las plantas estructurales anteriormente mencionadas.

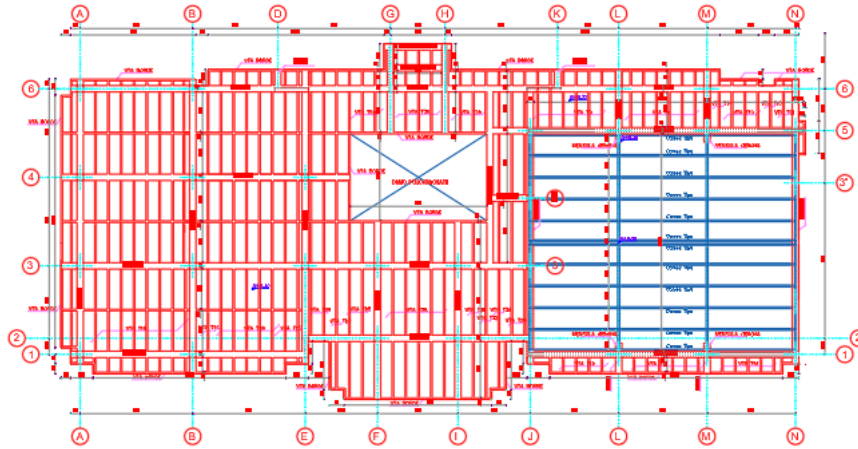
Figura 2. (a) Placa estructural planta 1; (b) Placa estructural planta 2; (c) Placa estructural planta 3.



(a)



(b)



(c)

Fuente: División de planta física UIS.

La edificación consta de una estructura irregular y asimétrica, presenta irregularidad tanto en planta como en altura. Se considera que en planta presenta una irregularidad tipo 2P (Retrosesos excesivos en las esquinas), pues la proyección de la estructura a ambos lados del retroceso en la planta número 2 es del 31%, superando el 15% que se considera referencia [6]. En altura se evidenció una irregularidad tipo 3A (Irregularidad Geométrica) [6], teniendo la placa 2 una dimensión 1.45 veces mayor a la placa 3.

2.1.3. Definición de materiales Según la información suministrada en los planos se obtiene el valor de f_c del concreto usado para vigas, columnas y muros; a partir de eso y siguiendo las indicaciones del Reglamento colombiano de construcción sismorresistente NSR-10 [6], en su título C, numeral C.8.5, se calcula el módulo de elasticidad usando la siguiente ecuación:

$$E_c = 3900\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

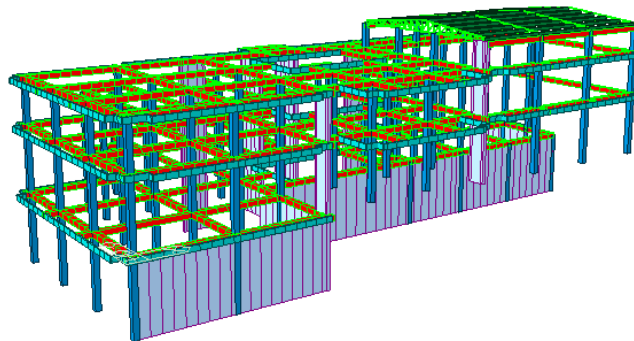
Tabla 1. Características del concreto.

Concreto	f'_c [MPa]	E_c [MPa]
Cimientos y muro de contención.	21	17872,04
Vigas, Columnas y Placas.	28	20636,86

2.2. ELABORACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Se elabora un primer modelo numérico empleando el software Midas Gen® 2017 (v1.1) con el fin de determinar las frecuencias de vibración y formas modales teóricas de la estructura las cuales se asume corresponden a un estado inicial sin daño.

Figura 3. Modelo analítico para la estructura del caso de estudio.



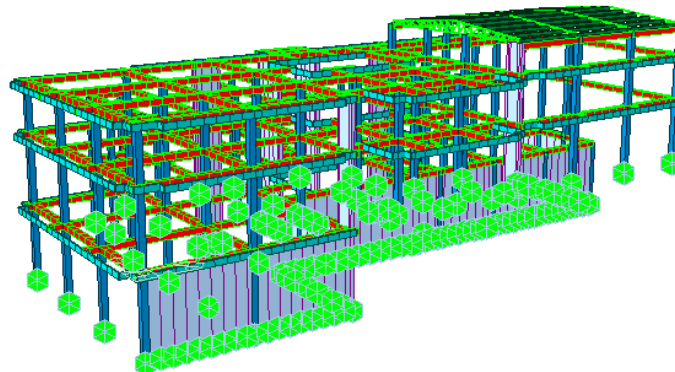
2.2.1. Masa Para el cálculo de los parámetros modales se considera como masa el peso propio de la estructura, la carga muerta de elementos no estructurales (muros divisorios) y la carga viva producida por el uso y ocupación en la edificación, la NSR-10 [6] sugiere una carga viva de 2 kN/m^2 , pero para efectos de cargar la estructura con las cargas más cercanas a la realidad no se utilizaron las cargas mínimas de diseño y se opta por usar de valor 0.3 kN/m^2 [7]. La masa del muro de reacción, así como la del puente grúa no se tienen en cuenta dado que están directamente cargados sobre la cimentación. En la Tabla 2. Se muestra la información acerca de las masas cargadas.

Tabla 2. Cargas.

Cargas	kN/m^2
Placa aligerada	4.43
Muros divisorios	2.0
Viva	0.3

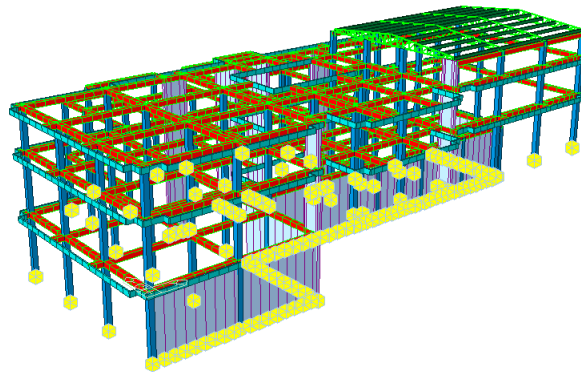
2.2.2. Condiciones de frontera Para la cimentación de la estructura se realizaron dos consideraciones, la primera en la cual se modeló como un apoyo empotrado sin tener en cuenta las condiciones del suelo en el cual se encuentra la edificación.

Figura 4. Empotramiento como condición de apoyo.



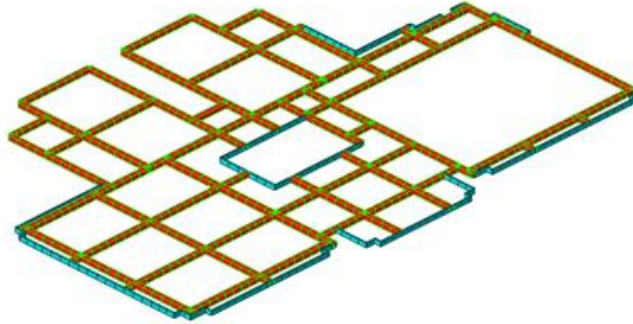
La segunda considera la cimentación como apoyos elásticos, asumiendo la rigidez del resorte modelado como la rigidez aportada por el suelo, basado en el parámetro coeficiente de balasto [8], suministrado en el estudio de suelos del lote.

Figura 5. Resortes en condición de apoyo.



2.2.3. Generación de los elementos estructurales y otras hipótesis El edificio fue construido como un modelo 3D, no se modelaron los muros de mampostería, por no ser considerados elementos estructurales, además de no contar con la información sobre el proceso constructivo de los mismo; las vigas y columnas de la edificación fueron modeladas como elementos tipo General Beam, ya que estos son generados para elementos estructurales prismáticos con seis grados de libertad en sus extremos, las uniones entre los elementos se definieron como conexiones rígidas, se modelaron los muros y el muro de contención con elementos tipo Wall, el cual considera la flexión en el plano y fuera del plano. Se tuvo en cuenta la cercha de la cubierta modelada con elementos tipo Truss. Inicialmente no se modeló la losa de entrepiso, por lo cual está dentro de las cargas que fueron impuestas. Se asignó un diafragma rígido a cada uno de los entrepisos. No se modelaron las zapatas ni las vigas de cimentación.

Figura 6. Modelo placa 2.



2.2.4. Análisis modal Una vez finalizada la construcción del modelo en Midas Gen® 2017 (v1.1) se realizó un análisis lineal de valores propios, el cual proporciona las propiedades dinámicas de una estructura, resolviendo la ecuación característica (2) compuesta por la matriz de masa y la matriz de rigidez:

$$[-\omega^2 M + K] \phi = 0 \quad (2)$$

Las propiedades dinámicas incluyen, modos naturales de vibración, periodos y frecuencias naturales. Sin embargo, este método de análisis considera un movimiento de vibración libre no amortiguada, razón por la cual se pueden generar diferencias con las pruebas experimentales [9]. Para este tipo de análisis el software convierte el peso propio de la estructura y las cargas impuestas en masas concentradas en los nodos.

2.2.4.1 Periodos y frecuencias naturales Se muestran los parámetros dinámicos para el primer modo predominante en la dirección X y en la dirección Y, como se muestra en las Tablas 3 y 4. No se consideraron modos predominantes en torsión dado que no fue posible realizar la identificación de estos modos en las campañas experimentales. Ver sección 2.3.

Tabla 3. Propiedades dinámicas del modelo empotrado.

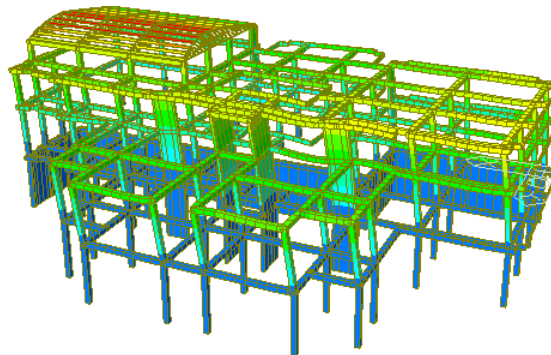
Modo	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
TRAN-X	2,1054	0,4750
TRAN-Y	2,4904	0,4015

Tabla 4. Propiedades dinámicas del modelo con resortes.

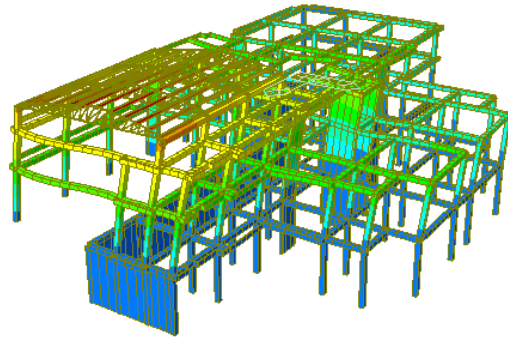
Modo	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
TRAN-X	1,4904	0,6709
TRAN-Y	1,826	0,5476

2.2.4.2 Modos naturales de vibración En la Figura 7 se muestran los modos de vibración asociados a las frecuencias mencionadas en el numeral anterior.

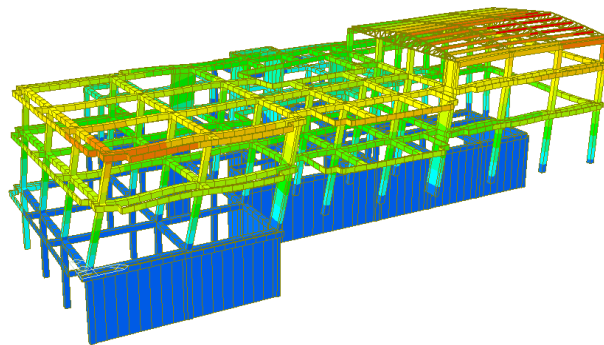
Figura 7. Primeros modos de vibración obtenidos del modelo teórico. (a) Modo TRAN-X [modelo empotrado]; (b) Modo TRAN-Y [modelo empotrado]; (c) Modo TRAN-X [modelo con resortes]; (d) Modo TRAN-Y [modelo con resortes].



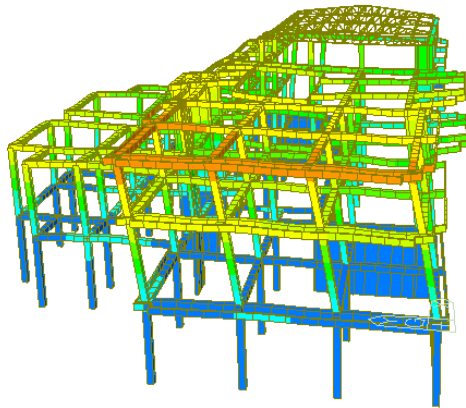
(a)



(b)



(c)



(d)

2.3. CAMPAÑAS EXPERIMENTALES

Para estas fueron realizadas dos mediciones de la edificación, ambas ejecutadas en etapa de funcionamiento, la primera en 2017 corresponde a un día de operación mínima del edificio en la cual no se presentaba tránsito de personas, vehículos en el exterior, ni manejo de equipos, la segunda en 2018 correspondiente a un día de operación normal de la edificación.

La campaña inicial, contó con una configuración en ejes independientes en puntos no relacionados de la edificación con el fin de identificar frecuencias fundamentales, mientras que la segunda campaña contó con un arreglo de ejes relacionados manteniendo un punto de referencia con el fin de identificar formas modales.

2.3.1. Equipo de adquisición de datos Para la adquisición de datos fueron utilizados tres Equipos Obsidian de Kinematics®, los cuales son acelerógrafos, cada uno con un Episensor triaxial interno de fuerza balanceada, orientado ortogonalmente, con un rango dinámico de 155 Db en un ancho de banda DC hasta de 100 Hz, un rango de escala completa de $\pm 2g$ a $\pm 4g$, oscilador digital sujeto a GPS, proporcionando sincronización y localización, el cual almacena los datos en intervalos ininterrumpidos de 5 minutos definidos por el usuario, para la extracción de los valores de aceleración se contó con el software de Kinematics® [10].

Figura 8. Acelerógrafo Obsidian.



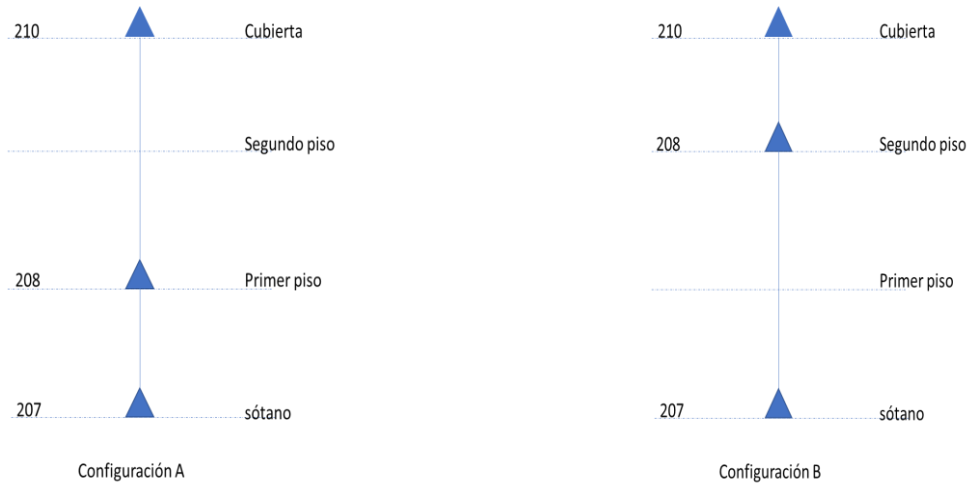
Fuente: Kinematics.

2.3.2. Ventanas de muestreo La determinación de la ventana de tiempo se calcula en base a los periodos de vibración que tuvo la estructura en el modelo de elementos finitos, teniendo en cuenta que debe ser entre 1000 y 2000 veces el periodo fundamental de la estructura [11] . Se define que las pruebas se realizarían durante intervalos de 20 min, una franja mayor a la estimada contando así con la posibilidad de reducir este tiempo si se presentaba alguna eventualidad en la toma de los datos.

2.3.3. Configuración en altura Ejes independientes: Para las mediciones realizadas en ejes independientes se tuvo en cuenta que no era necesario mantener un sensor de referencia fijo. Siguiendo las indicaciones encontradas en la NSR-10 título A.11 [6], sobre instrumentación de edificaciones, se sugiere utilizar mínimo 3 sensores, uno localizado en la base directamente sobre la cimentación, uno en la parte superior de la estructura y uno a media altura, debido a que se quería tener información de dos entrepisos a media altura se establecieron 2 arreglos diferentes (A) y (B) en el mismo eje, manteniendo los sensores en base y parte superior fijos, en el intervalo de tiempo de cada eje, y moviendo el sensor ubicado a media altura de un entrepiso al otro al finalizar cada medición.

Para los ejes ubicados en el voladizo, no fueron necesarios los dos arreglos, dado que el edificio cuenta solo con dos niveles en ese sector, y por ende era suficiente con los tres sensores para obtener información de cada uno.

Figura 9. Configuración ejes independientes.



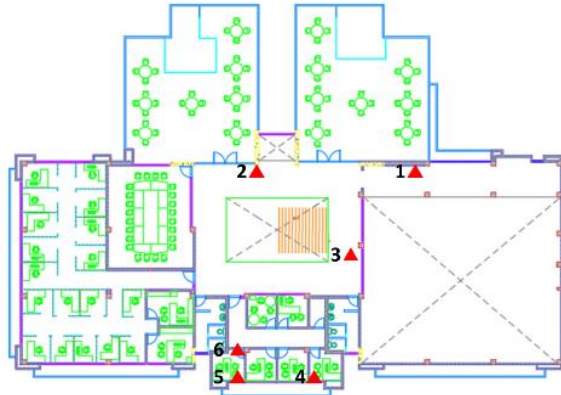
Ejes acoplados: Para esta configuración, es necesario mantener un sensor de referencia que permitiera acoplar las mediciones, por lo tanto se contaban con dos sensores para distribuir en ejes verticales no independientes, la localización del sensor de referencia fue basada en las formas modales obtenidas en el modelo numérico, en el cual se localizaron los puntos en los cuales se registran mayores desplazamientos, debido a que estos se presentan en el piso superior, el sensor de referencia se mantuvo fijo en la azotea. Para obtener información lo más detallada posible de todos los entrepisos de la estructura se utilizaron tres arreglos diferentes en el mismo eje (A), (B) y (C), como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Configuraciones para los ejes acoplados.



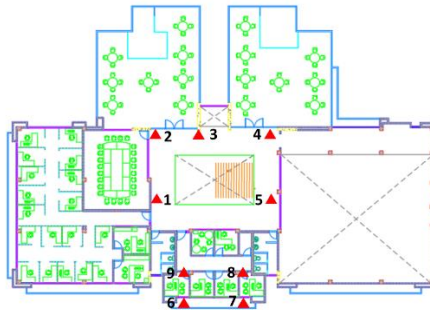
2.3.4. Configuración en planta Para la identificación de frecuencias y configuraciones modales en traslación, se colocan los acelerómetros cerca de los centros geométricos de la estructura [12]. Debido a la irregularidad que se presenta en la geometría del edificio el centro geométrico se encuentra en el vacío de la escalera y por lo tanto no se pueden realizar mediciones en este punto, debido a esto se distribuyó, la primera en ejes de interés aleatorio, además de al inicio y al final del voladizo como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Configuración en planta ejes independientes.



Para la segunda configuración se quería tener un conocimiento más detallado de la información modal de la edificación en estudio, de esta forma para la configuración acoplada, se ubicaron nueve ejes en puntos de la estructura, alrededor de su centro geométrico, y en el inicio y final del voladizo, debido a su particular interés.

Figura 12. Configuración en planta ejes acoplados.



2.3.5. Procesamiento de señales Para lograr la identificación de parámetros dinámicos por medio de pruebas de vibración, es necesario que la estructura en estudio sea sometida a una excitación que logre estimular los modos de vibrar de la edificación. Cuando se habla de vibraciones ambientales, se entiende que la excitación a la que está sometida la estructura proviene de fuentes tales como: tráfico vehicular alrededor a la estructura, viento, tránsito de peatonal, microsismos, funcionamiento de equipos sobre la estructura, temperatura, etc [13].

Se emplea la metodología de identificación no paramétrica de sistemas, la cual consiste en identificar las frecuencias del sistema utilizando funciones en el dominio de la frecuencia y a partir de ellas se determinan los diferentes parámetros modales asociados a cada una [9].

Para el análisis de las señales obtenidas a través de las pruebas de vibración ambiental se utilizó el software ARTeMIS Modal Pro®, por medio del cual se aplicó el método EFDD. El uso de este método permite la identificación de frecuencias, coeficientes de amortiguamiento y modos de vibración. Para la identificación de los modos, este método usa la descomposición en valores singulares (SVD) de la matriz espectral. Esta descomposición corresponde a separar la respuesta en un conjunto de funciones de densidad espectral, representando cada una un sistema de un grado de libertad (SDOF) [14].

2.3.5.1 Obtención y tratamiento de registros Los datos registrados en los acelerógrafos están dados en voltios en función del tiempo. Se realizó en el software Matlab® la conversión de estos registros a aceleración vs tiempo. Se aplicó en este mismo software la corrección de línea base o corrección de ceros, removiendo la línea de tendencia, puesto que la incorrecta nivelación de los sensores durante las pruebas produce errores en la línea de tendencia de los registros.

2.3.5.2 Identificación de frecuencias naturales Con la primera configuración tomada en el 2017 se realizó la identificación de frecuencias naturales en el software ARTeMIS Modal Pro®. Inicialmente se modeló la ubicación de los sensores para cada arreglo. Posteriormente se cargaron los registros en una matriz de nueve canales, la cual había sido ensamblada previamente; esta matriz contiene los registros de las componentes x, y, z, para cada uno de los tres sensores. Al cargar los datos al software, se aplicó un filtro pasa baja a la mitad de la frecuencia de muestreo (200hz) de acuerdo con el teorema de Nyquist. Adicionalmente se filtró la señal con el fin de extraer el rango de frecuencias de interés en este estudio (basadas en las frecuencias obtenidas en el modelo de elementos finitos). Se identificaron los picos de mayor amplitud en el espectro de densidad de valores singulares, para cada arreglo (eje). Este espectro brinda la potencia en decibeles (Db) que aporta cada una de las frecuencias que conforma la señal. Estos picos corresponden a las frecuencias fundamentales en dirección X y en dirección Y.

Figura 13. Espectro de densidad de valores singulares para el eje 2.

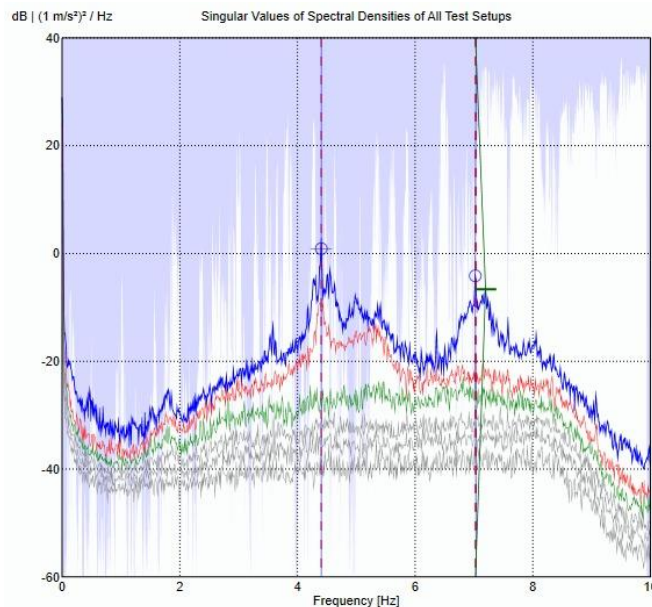


Tabla 5. Parámetros dinámicos en dirección Y.

	EJE 1	EJE 2	EJE 3
Frecuencia [Hz]	6,285	7,025	6,997
Periodo [s]	0,159	0,142	0,143
Amortiguamiento [%]	1,778	1,643	1,355
Periodo promedio [s]	0,147	0,147	0,147
Error [%]	8,578	2,860	2,471
	EJE 4	EJE 5	EJE 6
Frecuencia [Hz]	6,848	6,906	6,943
Periodo [s]	0,146	0,145	0,144
Amortiguamiento [%]	0,086	1,790	1,905
Periodo promedio [s]	0,147	0,147	0,147
Error [%]	0,349	1,186	1,712

Figura 14. Movimiento del EJE 2 dirección Y ($T=0.142s$).

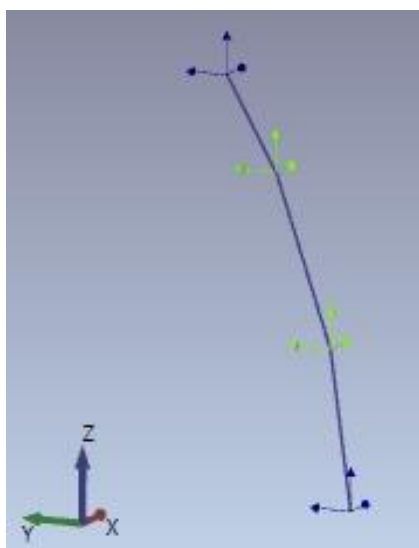
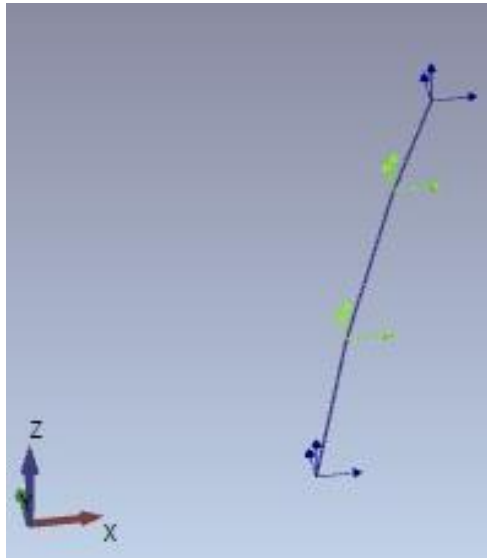


Tabla 6. Parámetros dinámicos en dirección X.

	EJE 1	EJE 2	EJE 3
Frecuencia [Hz]	4,298	4,543	4,483
Periodo [s]	0,233	0,220	0,223
Amortiguamiento [%]	1,778	1,589	0,419
Periodo promedio [s]	0,223	0,223	0,223
Error [%]	4,307	1,318	0,003
	EJE 4	EJE 5	EJE 6
Frecuencia [Hz]	4,528	4,541	4,516
Periodo [s]	0,221	0,220	0,221
Amortiguamiento [%]	0,957	1,745	2,540
Periodo promedio [s]	0,223	0,223	0,223
Error [%]	0,991	1,274	0,728

Figura 15. Movimiento del EJE 2 dirección X ($T=0.220s$).



2.3.5.3 Identificación de formas modales Una forma modal hace referencia a la manera de oscilar de una estructura correspondiente a una frecuencia determinada, de esta manera solo se seleccionaron las frecuencias identificadas a las cuales sea posible asociarles una forma modal que corresponda a las formas modales naturales de la estructura previamente identificadas en el modelo de elementos finitos.

Para esta identificación se utilizó el modelo de ejes acoplados ya que permitía el análisis de los diferentes puntos de la estructura en simultáneo y una visión global del comportamiento de la edificación en relación con las frecuencias previamente determinadas.

Se detectaron los picos de mayor amplitud en el espectro de densidad de valores singulares para la configuración de ejes acoplados, y se verificó que estos picos corresponden a las formas modales asociadas a las frecuencias fundamentales en dirección X y en dirección Y.

Figura 16. Espectro de densidad de valores singulares para la configuración acoplada.

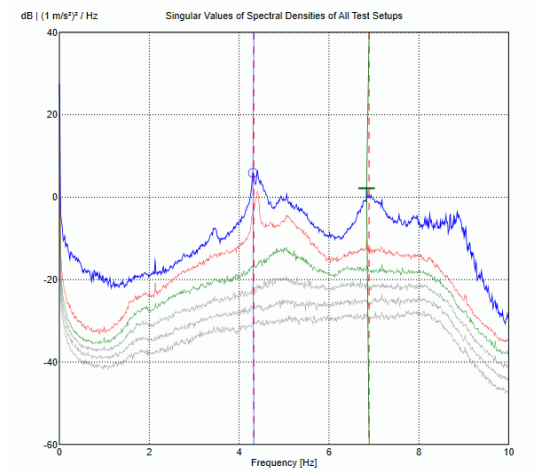


Tabla 7. Parámetros dinámicos correspondientes a las formas modales.

	X	Y
Frecuencia [Hz]	4,327	6,893
Periodo [s]	0,231107	0,14507471
Amortiguamiento [%]	0,571	1,471

Figura 17. Modo 1, traslacional en dirección X (T=0.2311s).

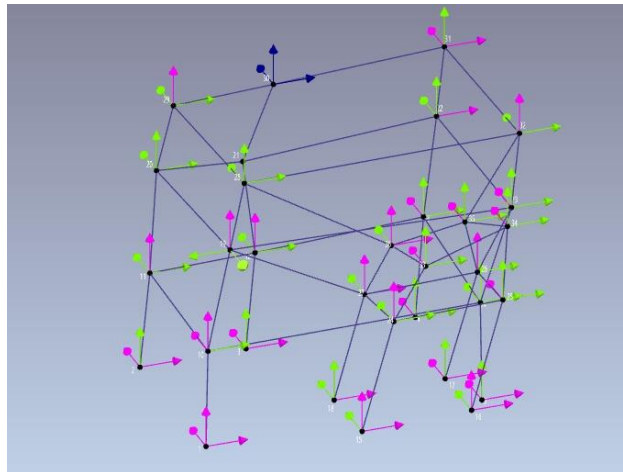
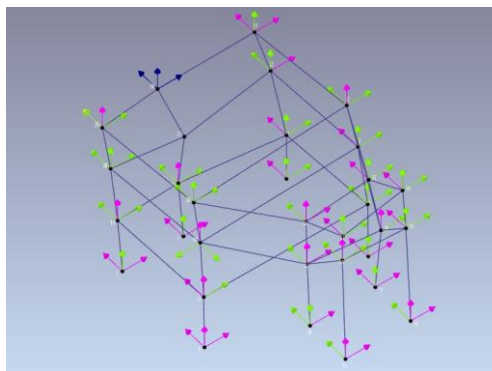


Figura 18. Modo 2, traslacional en dirección Y (T=0.1450s).



Este procedimiento deja como resultado, vectores de desplazamiento correspondientes a cada modo, que permiten la observación grafica de la oscilación de la estructura correspondiente a la forma modal y la comparación con el modelo de elementos finitos.

Figura 19. Modo de Vibración 1, en dirección X ($T=0.2311s$).

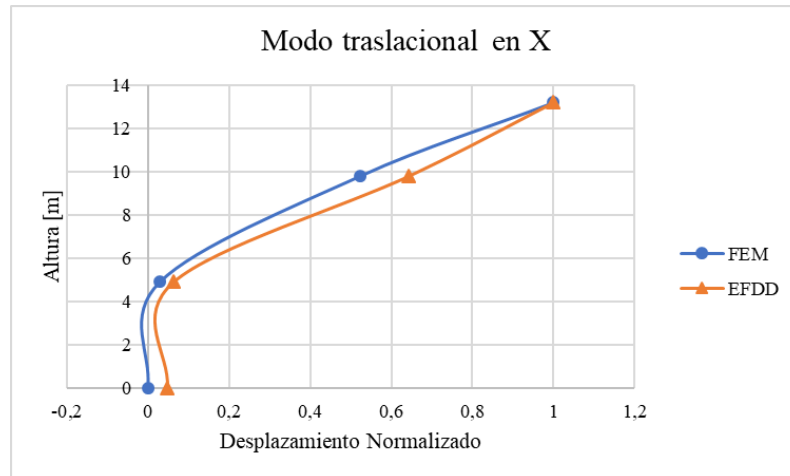
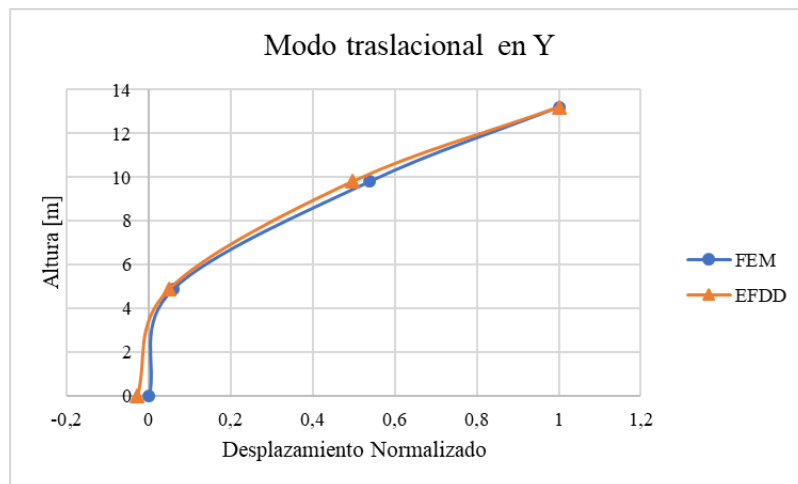
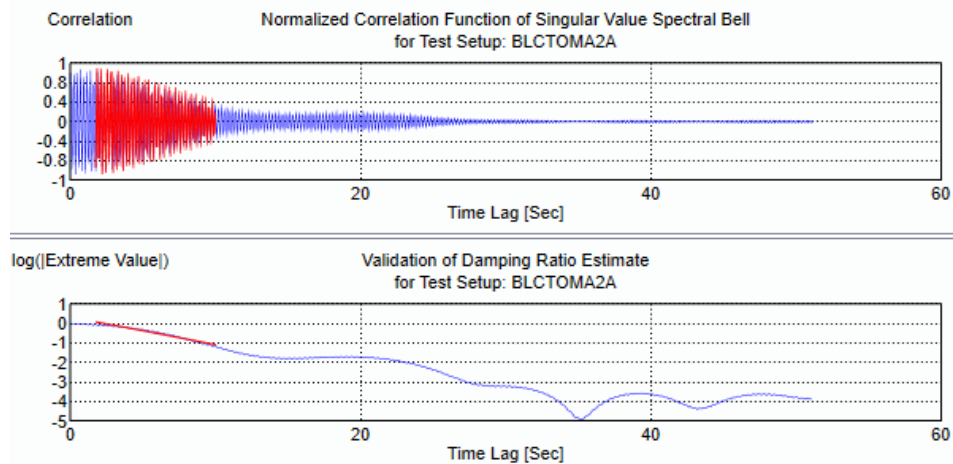


Figura 20. Modo de Vibración 2, en dirección Y ($T=0.1450s$).



2.3.6. Estimación de los porcentajes de amortiguamiento Para la estimación del amortiguamiento correspondiente a la estructura real en estado actual se utilizó el software ARTeMIS Modal Pro®, el cual realiza dicha estimación mediante la identificación de los extremos positivos y negativos de la función de correlación. Tomando el logaritmo de esta curva en descomposición, para los sistemas lineales amortiguados viscosos se obtendrá una línea recta en la que la relación de amortiguamiento se puede estimar mediante regresión lineal. Sin embargo, debido al ruido de banda ancha y / o no linealidades, el comienzo y el final de la curva pueden no ser rectos. Tales partes no rectas no deberían incluirse en la regresión [1]. De este modo se obtuvieron valores de amortiguamiento mostrados en las Tablas 5,6 y 7.

Figura 21. Estimación del porcentaje de amortiguamiento para el modo 1 ($T=0.2311s$).



2.4. COMPARACIÓN DE PARÁMETROS MODALES

El índice de MAC es usado, para cuantificar la similitud entre dos formas modales [15]. Este método proporciona una medida de la consistencia (grado de linealidad) entre estimaciones de un vector modal, mediante la determinación de la desviación mínima cuadrada de una estimación sobre otra [16]. Su definición matemática se expresa a continuación:

$$MAC_{K1,K2} = \frac{(\varphi_{K1}^T \cdot \varphi_{K2})^2}{(\varphi_{K1}^T \cdot \varphi_{K1})(\varphi_{K2}^T \cdot \varphi_{K2})} \quad (3)$$

Donde φ_{ki} es el vector columna con la configuración modal.

Basándose en los resultados obtenidos con la aplicación del índice MAC, se pudo corroborar que las formas modales que se lograron identificar por medio de las pruebas de vibración ambiental y en el modelo de elementos finitos se correlacionan entre ellas de manera adecuada.

Tabla 8. Índice MAC, entre formas modales obtenidas en Midas y en pruebas de vibración ambiental.

		FEM Midas	
		0,4298	0,3748
AVT	0,231107	0,98987119	0,9923706
	0,145074	0,99855205	0,99819751

Valores de índice MAC por encima de 0.9 indican correspondencia consistente entre las formas modales a comparar [17].

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La existencia de daño estructural en un sistema conduce a la modificación en los parámetros modales.

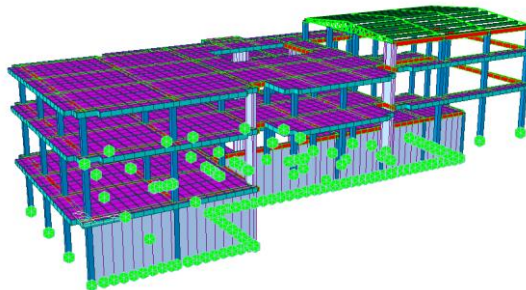
Dado que

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (4)$$

Cuando una estructura presenta un daño tal que se haya afectado la rigidez, las frecuencias naturales tendrían que disminuir sustancialmente. En el caso de estudio, se observa que las frecuencias naturales obtenidas experimentalmente son mayores a la estimación teórica. Por lo tanto, estas frecuencias más altas corresponderían a que la estructura es más rígida de lo esperado [18].

Con el fin de lograr mayor correspondencia entre las campañas experimentales y el modelo de elementos finitos, se decide modelar la placa de entre piso, considerar los apoyos tipo empotramiento y las conexiones vigas columna como links infinitamente rígidos, para esta última consideración se emplea la función *beam end offsets*, en Midas Gen® que permite asignar extremos rígidos a los elementos tipo beam.

Figura 22. Modelo 3D ajustado.



Se aplicó el método de análisis modal anteriormente propuesto, método lineal de valores propios. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Propiedades dinámicas del modelo ajustado.

Modo	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
TRAN-X	2,3604	0,4237
TRAN-Y	2,7038	0,3698

Se evidencia la disminución en los periodos de los dos modos, de acuerdo con la ecuación (4) para obtener este resultado debería ser necesario un aumento en la rigidez o una disminución en la masa, en este caso se podría inferir que se presentó un aumento en la rigidez a causa de los ajustes realizados, puesto que la masa permaneció constante en los dos modelos.

Del mismo modo que para el modelo anterior, se obtuvieron los desplazamientos normalizados y se comparó la forma modal que representaban respecto a las obtenidas con vibración ambiental.

Figura 23. Modo de Vibración 1, modelo ajustado, en dirección X (T=0.2311s).

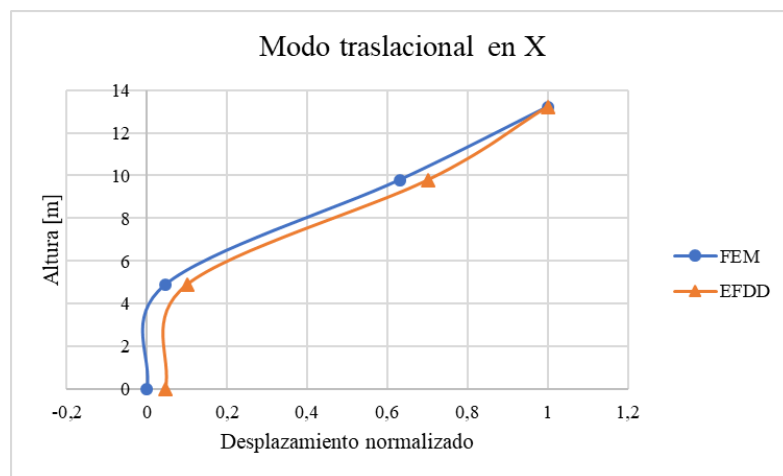
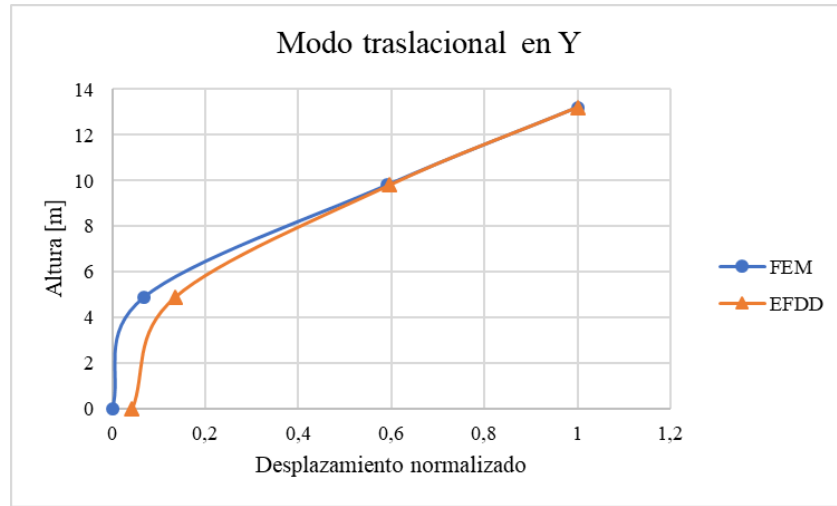


Figura 24. Modo de vibración 2, modelo ajustado, en dirección Y (T=0.1450).



A modo de correlación también se calculó el índice MAC entre las formas modales de Artemis y las formas modales del modelo ajustado.

Tabla 10. Índice MAC, entre formas modales obtenidas en Midas ajustado y en pruebas de vibración ambiental.

		FEM Midas	
		0,4298	0,3748
AVT	0,231107	0,99445521	0,99192275
	0,145074	0,99216548	0,99546492

Respecto al anterior modelo se obtuvo una mejor correlación, en la diagonal principal de la matriz de MAC encontrando los valores aún más próximos a la unidad.

La finalidad de realizar el ajuste al modelo no fue calibrarlo a los datos experimentales obtenidos, por el contrario, se quiso disminuir las idealizaciones que se habían realizado en el modelo inicial. Es por este motivo que no se realizó

modificación alguna a el módulo de elasticidad de los materiales usados, aun cuando este cambio podría modificar considerablemente la rigidez de la estructura acercándola a los datos experimentales, sin embargo, se valoró no viable el aumento de este módulo dado que no se tenía información de ensayos realizados durante la construcción y según la información que se tiene la estructura ya cuenta con un material de módulo de elasticidad alto.

En la NSR-10 no se considera los muros de mampostería no reforzada como elementos estructurales [6], aun cuando estos pueden aportar una rigidez considerable al sistema dependiendo de su forma constructiva, para evitar que suceda este aumento de rigidez, los muros deben aislarse de la estructura mediante un adecuado proceso constructivo [19]. En vista que para el caso de estudio no se cuenta con la información necesaria para determinar el aporte de rigidez de los muros a la estructura y dado que este aspecto no se abarca dentro de este proyecto, para futuras investigaciones se sugiere tener en cuenta la interacción entre los muros no estructurales y la estructura principal, teniendo presente que esta consideración puede hacer aumentar la rigidez hasta en un 300% [19].

4. CONCLUSIONES

En este documento están representados los resultados del análisis modal del edificio Centro de Caracterización de Materiales, así como su caracterización dinámica teórica basada en el modelado en elementos finitos 3D y experimental fundado en las pruebas de vibración ambiental aplicadas.

Luego de obtener y analizar los resultados se puede concluir que:

Realizando el modelado de la edificación teniendo en cuenta diferentes hipótesis de idealización, siguiendo los posibles casos que se podrían presentar en la realidad se obtuvieron parámetros dinámicos como frecuencias fundamentales, periodos de vibración y formas modales.

En el proceso de modelado de una estructura en un software de elementos finitos, existen muchas variables que condicionan la respuesta dinámica de la misma, entre ellas las condiciones de apoyo, el material de los elementos, la rigidez en las conexiones, y posible rigidez que aporten elementos no estructurales, en consecuencia, según el detallado del modelado se pueden obtener resultados más cercanos a la realidad.

Las pruebas de vibración ambiental presentan una ventaja importante, en cuanto a la facilidad de poder realizarlas mientras la edificación se encuentre en servicio, sin ver alterados los resultados del estudio del comportamiento dinámico de una estructura, tal como se evidenció en los resultados de las dos mediciones realizadas

en la ejecución de este proyecto para las cuales se obtuvieron los mismos parámetros pese a que la actividad en el edificio fue considerablemente mayor en una de las mediciones.

Aun cuando las pruebas de vibración ambiental son un método apropiado a la hora de caracterizar dinámicamente una estructura, es necesario contar con una excitación que logre estimular las formas modales de la misma, de lo contrario, no se podrá identificar con claridad los modos de vibración, en especial si en edificaciones de periodo corto como lo son edificios de poca altura, rígidos y muy hiperestático.

El diseño de la instrumentación de una estructura está condicionada a los parámetros que interese monitorear para el caso de Bucaramanga debido a la alta amenaza sísmica, el principal interés se centra en la respuesta dinámica, si el objetivo es identificar frecuencias naturales se puede analizar por ejes verticales independientes, teniendo presente que se debe disponer de un sensor en la base de la estructura y otro en la última planta, en los pisos intermedios se pueden intercalar los sensores. Mientras que, si la finalidad es extraer formas modales, es necesario diseñar una configuración que integra diferentes ejes en planta y en altura, siempre contando con un sensor de referencia constante en el tiempo dispuesto en el último nivel.

Basados en los modos de vibración identificados de manera experimental se concluyó que la estructura es más rígida comparada con los modelos de elementos

finitos, debido a que se obtuvieron mayores frecuencias en campo. Por esta razón como resultado del análisis de detección de daño se obtuvo que mediante las pruebas de vibración ambiental realizadas no fue posible determinar de manera contundente si la estructura presenta daño, ya que no se presentó disminución alguna en la rigidez de la estructura. Sin embargo, no se puede descartar algún tipo de daño local que no comprometa la rigidez y estabilidad de la estructura en general. Por esta razón se sugiere que a futuro se realicen estudios más detallados a nivel local de la estructura, en el área que por inspección visual se presume presenta daño, teniendo en cuenta que para futuras investigaciones se tiene la información modal producto de las campañas experimentales realizadas durante este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] ARTEMIS MODAL PRO, v.5.0, 2017 Structural Vibration Solutions A/S.
- [2] MIDAS GEN, v2.2, 2016, MIDAS Engineering Software.
- [3] FORDE, M. C. y MCCANN, D. M. Review of NDT methods in the assessment of concrete. NDT&E International, 2001, vol. 34, p. 71-84.
- [4] HENAO, Ángel. Identificación de las propiedades dinámicas de una estructura sometida a vibración ambiental empleando análisis espectral. Tesis de Maestría. Medellín: Universidad EAFIT, 2013.
- [5] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, 1998.
- [6] COMISIÓN ASESORA PERMANENTE PARA EL RÉGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10. Bogotá D.C: 2010. 406 p.
- [7] GARCÍA REYES, L. Resultados de la fase 2, Bogotá: Universidad de los Andes. Nov, 2014.
- [8] FREIRE TELLADO, M. Precisiones para el empleo del método del módulo de balasto en edificación. Informes de la construcción, 1999, vol. 51, nº 463, pp. 23-34.
- [9] MERINO, Yvonne. Identificación de las propiedades dinámicas del edificio de ingenierías de la Universidad Eafit mediante pruebas de vibración ambiental. Tesis de Maestría. Medellín: Universidad EAFIT, 2014.

- [10] KINEMATRICS, Datasheet manual Obsidian accelerograph kinematics. 2015 Octubre [En línea]. 2015. Disponible en: <https://kinematics.com/wp-content/uploads/2017/04/datasheet-obsidian-accelerograph-kinematics.pdf>.
- [11] ZHI-YUAN, Y; FENG-QUAN, W y CHUN-SHENG Z. A method of online damage identification for structures based on ambient vibration, Applied Mathematics and Mechanics. Applied Mathematics and Mechanics, 2005, vol. 26, nº 2, p. 7.
- [12] MURIA VILA, D y GONZÁLES ALCORTA, R. Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. Revista de ingeniería Sísmica, 1995, vol. 51.
- [13] GÓMEZ ARAUJO, I; E. MALDONADO RONDÓN. E y CHIO CHO, G. Pruebas de Vibración ambiental en Puentes. UIS Ingenierías, 2010, vol. 9, nº 1, p. 13.
- [14] GADE, S; MØLLER, N y HERLUFSEN. H. Frequency Domain Techniques for Operational Modal Analysis. 1st IOMAC Conference, Denmark, 2005.
- [15] BARRIOS, Ricardo; DOZ, Graciela y ITURRIOZ, Ignacio. Detección de daño en estructuras utilizando propiedades dinámicas. Argentina: Universidad Nacional de Nordeste, 2000.
- [16] ANCONA LAZCANO, A. R., *et al.* Evaluación de métodos de detección de daño en estructuras mediante el uso de vibraciones. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, 2011.
- [17] PASTOR, M; BINDA, M y HANCARIK, T. Modal Assurance Criterion. Procedia Engineering. 2012, vol. 48, p. 545.

[18] SALAWU, O. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*, 1997, vol. 19, nº 9, p. 718-723.

[19] ROCHEL, Roberto. Influencia de los muros de mampostería en el comportamiento de las estructuras aporticadas. *Revista Universidad EAFIT*, 1992, vol. 90, p. 71-79.

BIBLIOGRAFÍA

BARRIOS, Ricardo; DOZ, Graciela y ITURRIOZ, Ignacio. Detección de daño en estructuras utilizando propiedades dinámicas. Argentina: Universidad Nacional de Nordeste, 2000.

COMISIÓN ASESORA PERMANENTE PARA EL RÉGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10. Bogotá D.C: 2010. 406 p.

HENAO, Ángel. Identificación de las propiedades dinámicas de una estructura sometida a vibración ambiental empleando análisis espectral. Tesis de Maestría. Medellín: Universidad EAFIT, 2013.

MERINO, Yvonne. Identificación de las propiedades dinámicas del edificio de ingenierías de la Universidad Eafit mediante pruebas de vibración ambiental. Tesis de Maestría. Medellín: Universidad EAFIT, 2014.

ROCHEL, Roberto. Influencia de los muros de mampostería en el comportamiento de las estructuras aporticadas. Revista Universidad EAFIT, 1992, vol. 90, p. 71-79.