

**EVALUACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS DE UNA ESTRUCTURA
MEDIANTE PRUEBAS DE VIBRACION AMBIENTAL. CASO DE ESTUDIO:
EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN – SEDE UIS BUCARAMANGA.**

EDWIN FABIAN BERNAL CAICEDO

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

2020

**EVALUACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS DE UNA ESTRUCTURA
MEDIANTE PRUEBAS DE VIBRACION AMBIENTAL. CASO DE ESTUDIO:
EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN – SEDE UIS BUCARAMANGA.**

EDWIN FABIAN BERNAL CAICEDO

**Trabajo de grado para obtener el título de
ingeniero civil**

**Director:
GUSTAVO CHIO CHO
PhD. Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2020**

*Dedicado a mi madre Maribel, mi padre Pedro y hermanos,
por su apoyo, acompañamiento en mi carrera y en transcurso
de mi crecimiento intelectual y personal.*

*A Ludy y mi hijo Mateo, por ser la motivación de seguir,
por ustedes sigo adelante.*

*A mis familiares y amigos cercanos que creyeron en mí, me
apoyaron y ayudaron en las dificultades que
surgieron durante la carrera.*

Gracias.

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento especial al PhD. Gustavo Chío Cho, por confiar en mí, apoyarme en la realización de este proyecto.

A mis familiares que me apoyaron y se sacrificaron para continuar con mis estudios.

A mis compañeros que me ayudaron en la realización de este proyecto, por estar pendientes y prestos a acompañarme.

A la familia Veloza Aceros, quienes han estado pendientes de mi progreso y facilitaron el paso por la Universidad.

A la Universidad Industrial de Santander, por su excelencia, disposición, enseñanza y acogimiento.

Gracias.

Edwin Fabian Bernal Caicedo

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS.....	15
2. CASO DE ESTUDIO	16
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN.....	16
2.2 VERIFICACIÓN DE INFORMACIÓN	19
3. METODOLOGIA	21
3.1 MODELAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	21
3.1.1 Cargas	21
3.1.2 Parámetros dinámicos iniciales.....	22
3.2 CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	24
3.2.1 Equipo de adquisición de datos.	25
3.2.2 Ubicación de sensores.....	25
3.2.3. Tiempo de medición.....	27
3.3 PROCESAMIENTO DE SEÑALES	27
3.3.1 Identificación de frecuencias naturales.	29
3.3.2 Identificación de los modos de vibración.....	30
3.3.3 Identificación de los coeficientes de amortiguamiento.	32
3.3.4 Criterio de confianza modal.	33
3.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.....	34
3.4.1 Estimación inicial.....	35
3.4.2 Modelo final.....	35
4. CONCLUSIONES	41
5. RECOMENDACIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	43

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del concreto.	20
Tabla 2. Cargas verticales suministradas.	22
Tabla 3. Cargas horizontales suministradas.	22
Tabla 4. Propiedades dinámicas identificadas en el modelo.	23
Tabla 5: Frecuencias identificadas.	30
Tabla 6. Coeficientes de amortiguamiento correspondiente a cada frecuencia fundamental.	33
Tabla 7. Comparación de frecuencias entre modelo numérico y campaña experimental.	35
Tabla 8. Comparación de propiedades mecánicas entre el modelo numérico inicial y el final.....	36
Tabla 9. Tabla de resultados de las propiedades dinámicas del proceso de calibración.....	38
Tabla 10. Comparación de los registros históricos.	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fachada principal	16
Figura 2: Cimentación.....	17
Figura 3. Placa piso 1.....	18
Figura 4. Placa piso 2.....	18
Figura 5. Placa cubierta.....	19
Figura 6. Comparación de vigas y columnas. a) Eje N diseñado inicialmente y b) Estado actual de la construcción.....	20
Figura 7. Modelo numérico inicial	21
Figura 8. Modo inicial en torsión, $T=0.333$ s.....	23
Figura 9. Modo inicial en dirección X, $T=0.244$ s.....	24
Figura 10. Modo inicial en dirección Y, $T=0.213$ s.....	24
Figura 11. Sensor Obsidian	25
Figura 12. Configuración por ejes.....	26
Figura 13. Configuración en planta.....	27
Figura 14. Espectro de valores singulares.....	30
Figura 15. Modo 1, en dirección X ($T=0.23$ s).....	31
Figura 16. Modo 2, rotacional ($T=0.201$ s).....	31
Figura 17. Modo 2, en dirección Y ($T=0.147$ s).....	32
Figura 18. Estimación para porcentaje de amortiguación en $f=0.435$ Hz, Modo X, setup 2.....	33
Figura 19. Criterio MAC.....	34
Figura 20. Modo final en dirección X, $T=0.232$ s.....	37
Figura 21. Modo final en torsión, $T=0.192$ s.....	37
Figura 22. Modo final en dirección Y, $T=0.147$ s.....	38
Figura 23. Modelo numérico calibrado en el software ATABS 2017.....	39

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 del edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

ANEXO B. Modelo calibrado en el software ETABS 2017.

ANEXO C. Pórtico simulado de la ubicación de señales obtenidas en la campaña experimental en el software ARTeMIS Modal Pro V.6.0.

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS DE UNA ESTRUCTURA MEDIANTE PRUEBAS DE VIBRACION AMBIENTAL. CASO DE ESTUDIO: EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN – SEDE UIS BUCARAMANGA*.

AUTOR: Edwin Fabian Bernal Caicedo**

PALABRAS CLAVE: Vibración ambiental, Calibración, Propiedades dinámicas, Estructura combinada.

DESCRIPCIÓN:

En este documento se presenta una calibración del modelo numérico en el software ETABS 17® de la estructura combinada de una edificación en concreto reforzado ubicado en el campus de la Universidad Industrial de Santander sede Bucaramanga, como paso inicial para una evaluación de la salud estructural de la edificación. El procedimiento de calibración se realizó acercando las propiedades dinámicas del modelo numérico creado inicialmente con los parámetros que se registraron en las memorias de diseño y construcción, con las medidas experimentalmente, variando las propiedades de los materiales y teniendo en cuenta otros elementos no estructurales que puedan aportar rigidez a la estructura.

Para ello se realizaron pruebas de vibración ambiental (Ambient Vibration Test – AVT) por medio de sensores tipo acelerógrafos triaxiales OBSIDIAN marca Kinometrics®, cuyo tratamiento de señales se desarrolló mediante los software Matlab® y ARTeMIS Modal Pro® por el método no paramétrico de Descomposición del Dominio de la Frecuencia Mejorado (Enhanced Frequency Domain Decomposition – EFDD) del cual se obtienen las propiedades dinámicas del estado actual de la edificación (Frecuencias fundamentales, Modos de vibración y Porcentaje de amortiguamiento) que son usadas para simular el comportamiento real de la estructura en el modelo calibrado de elementos finitos.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Gustavo Chio Cho, Ingeniero Civil, PhD.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF A STRUCTURE THROUGH AMBIENT VIBRATION TESTS. CASE STUDY: ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN BUILDING - HEADQUARTERS OF UIS BUCARAMANGA. *

AUTHORS: Edwin Fabian Bernal Caicedo**

KEYWORDS: Ambient vibration, Calibration, Dynamic properties, Combined structure.

DESCRIPTION:

This document presents a calibration of the numerical model in the ETABS 17® software of the combined structure of a reinforced concrete building located on the campus of the Industrial University of Santander, Bucaramanga headquarters, as an initial step for an evaluation of the structural health of the building. The calibration procedure was carried out by approaching the dynamic properties of the numerical model created with the parameters that are recorded in the design and construction memories, with the experimental measurements, varying the properties of the materials and taking into account other non-structural elements that could contribute rigidity to the structure.

For this ambient vibration tests (AVT) are tested by means of Kinematics® brand OBSIDIANO triaxial accelerometer sensors, whose signal processing is affected by Matlab® and ARTEMIS Modal Pro® software by the non-parametric method of Decomposition of the Enhanced Frequency Domain (EFDD) from which the dynamic properties of the current state of the building are selected (Fundamental Frequencies, Vibration Modes and Damping Percentage) that are used to simulate the real behavior of the structure in the finite element calibrated model.

* Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Gustavo Chio Cho, Ingeniero Civil, PhD.

INTRODUCCIÓN

En el transcurso de la vida útil de una edificación, su estructura puede sufrir afectaciones por deterioro, sismos, exposición al ambiente, desastres naturales, errores de diseño y/o construcción; siendo los sismos un evento extremo que las somete a excitaciones de gran magnitud (Colombia en Armenia (1999), Chile en la costa de Biobío (2010), Ecuador en la provincia de Manabí (2016), México en Axochiapan de Morelos (2017)) y por ello la mayor amenaza para las estructuras, especialmente en la Ciudad de Bucaramanga por su cercanía al segundo nido sísmico más activo de la Tierra.

El desarrollo tecnológico ha traído consigo, no solo softwares para el modelamiento en elementos finitos de una estructura que verificar el cumplimiento de los requisitos generales de diseño (NSR-10, Título A, 2010) con facilidad y en un mínimo tiempo; sino también se han creado métodos para la verificación de dichos requisitos del comportamiento durante y después de su etapa de construcción, en el transcurso de la vida útil de la edificación. Las pruebas de vibración ambiental (AVT, por sus siglas en inglés) son el tipo de mediciones más usadas por ser un método no destructivo, de menor costo y se pueden realizar sin afectar su funcionamiento, con respecto a las pruebas de vibración forzada y sísmica.

Debido a las constantes preocupaciones que se han presentado sobre el estado del edificio: “Álvaro Beltrán Pinzón” ubicado en el campus central de la Universidad Industrial de Santander, por las grietas en la fachada y en las uniones estructurales, múltiples estudios e hipótesis se han hecho a la estructura (Agredo, Hernán, 2018), (Cotes Rincones, Marcos; Hoyos Luna, Ingrid, 2016) y gracias a ellos se encuentra la información detallada de planos y materiales; estos hechos ayudaron a tomar la decisión de usar esta estructura como caso de estudio para la

propuesta de llevar a cabo un informe acerca del modelado estructural utilizando pruebas de vibración ambiental y tener un precedente en el uso de estas metodologías como paso inicial al diagnóstico del estado real de una edificación. Para ello en este documento se presenta el modelo numérico calibrado del estado actual de la estructura en el software ETABS 17.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la las propiedades dinámicas del edificio Álvaro Beltrán Pinzón mediante pruebas de vibración ambiental.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar el edificio Álvaro Beltrán Pinzón mediante en el software ETABS®, con base en los planos estructurales y características actuales de los materiales.
- Realizar las campañas experimentales de vibración ambiental en la estructura.
- Calibrar el modelo numérico.

2. CASO DE ESTUDIO

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN

El edificio Álvaro Beltrán Pinzón se encuentra dentro el campus central de la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga – Colombia), proyectado como Centro de Caracterización de Materiales de Construcción con un área construida de 2275,76 m². Consta de tres pisos con altura total de 15,2 m medidos desde el sótano hasta la cubierta, en la cual presenta una Irregularidad en altura Tipo 3A – Irregularidad geométrica por ser la placa de cubierta más pequeña. (NSR-10 Capítulo A.3, 2010) (ver figura 1) (Anexo A).

La edificación fue diseñada bajo la norma NSR-98, con estudio de suelos realizado en el año 1998 y se estima la finalización de su construcción en el año 2006 (Afanador Beltrán, Daniela; Gutiérrez Gómez, Andrea, 2018).

Figura 1: Fachada principal

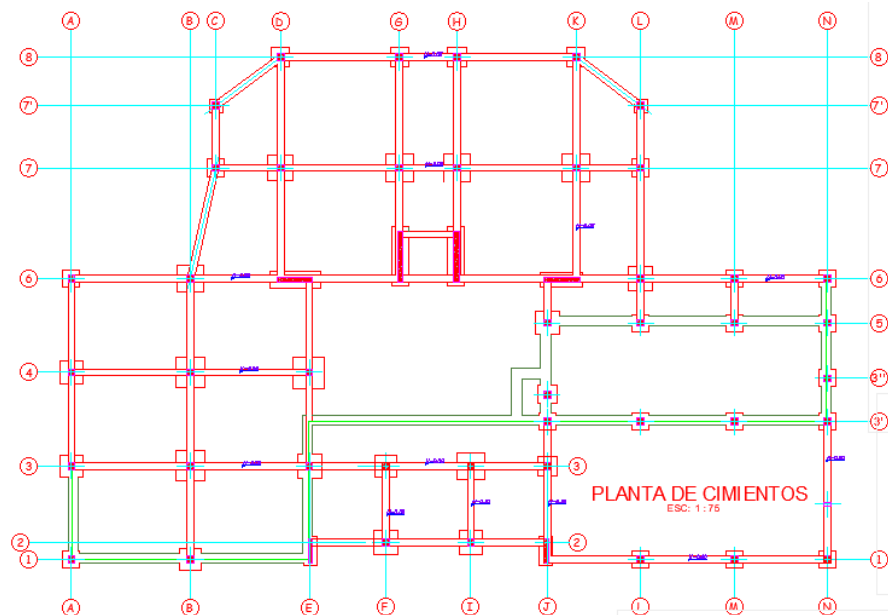


Fuente: Planos arquitectónicos existentes, suministrados por planta física.

Consta de 14 ejes en dirección Sur-Norte identificado por letras mayúsculas y 12 ejes en dirección Oeste-Este identificados por números. Sistema estructural de pórtico y muros en hormigón armado en donde todas sus columnas y vigas tienen

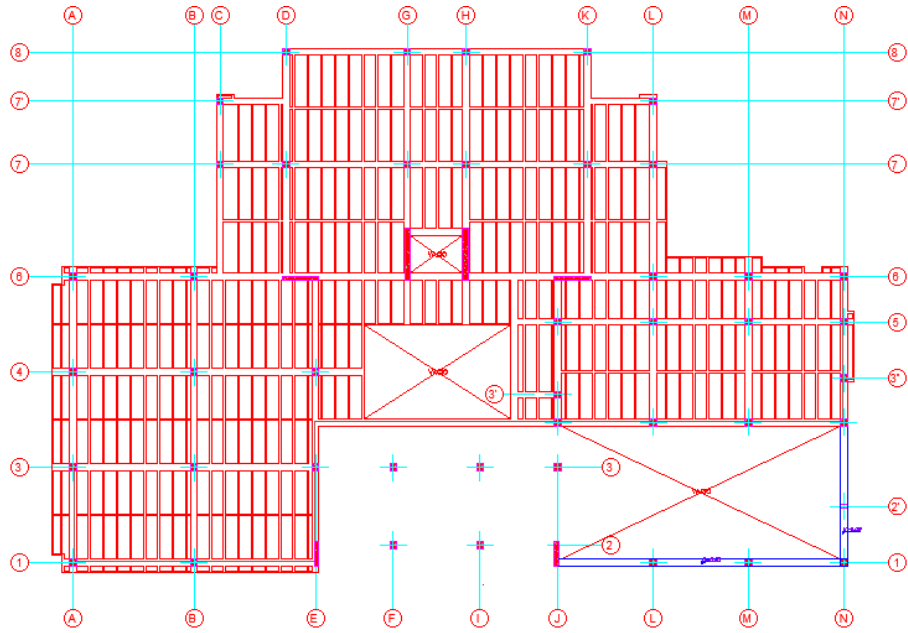
una dimensión de 0,4 x 0,4 m, con placa aligerada de 0,05 m sostenida por viguetas de 0,1 x 0,4 m de sección separadas 0,8 m que no se considera como diafragma para el modelamiento por su irregularidad en las placas de entrepiso 2 y 3 al lado Este donde se encuentra el puente grúa y muro de reacción con irregularidad en planta Tipo 3P – Discontinuidad en el diafragma (NSR-10 Capitulo A.3. 2010), 6 muros estructurales de 0,25 m, un muro de contención de 0,3 m anclado a la estructura en toda la parte sur del sótano y sistema de cimentación con zapatas céntricas.

Figura 2: Cimentación.



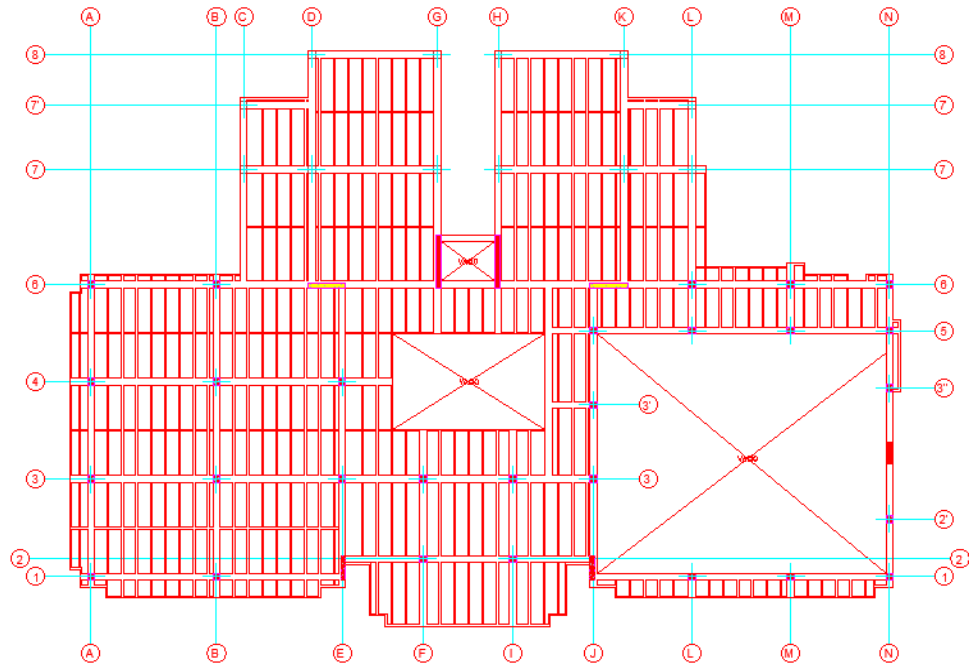
Fuente: Planos estructurales existentes, suministrados por planta física.

Figura 3. Placa piso 1.



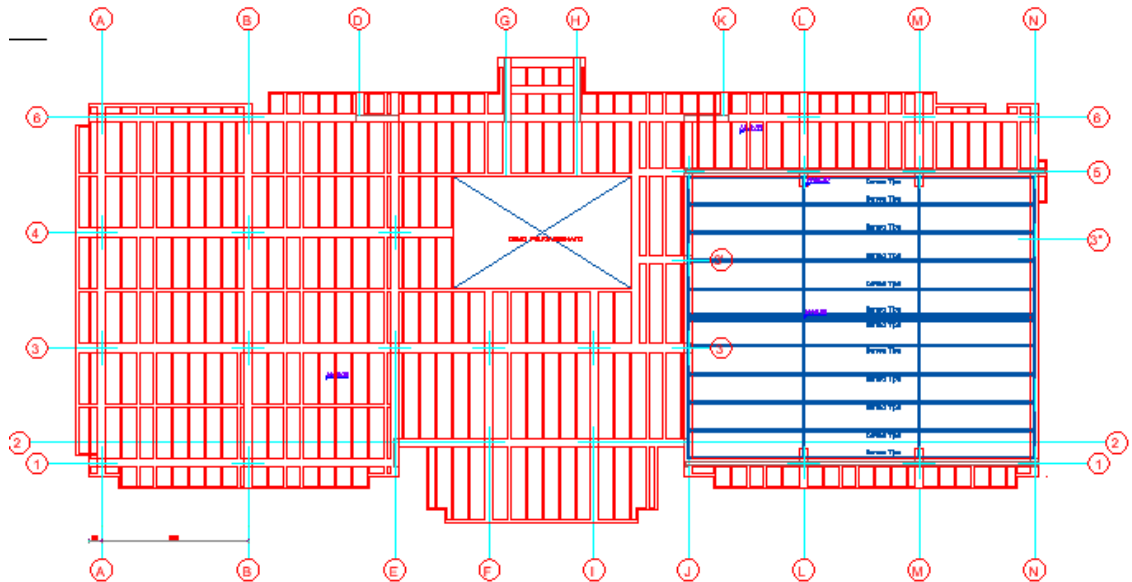
Fuente: Planos estructurales existentes, suministrados por planta física.

Figura 4. Placa piso 2.



Fuente: Planos estructurales existentes, suministrados por planta física.

Figura 5. Placa cubierta.



Fuente: Planos estructurales existentes, suministrados por planta física.

2.2 VERIFICACIÓN DE INFORMACIÓN

Además del estudio de suelos y los planos de la edificación facilitados por la Universidad, se han hecho verificaciones anteriores de los planos y las propiedades de la estructura, ratificando y corrigiendo la información acerca de propiedades de los materiales y la ubicación real de los elementos estructurales. (Agredo, Hernán, 2018) realizó un ensayo de esclerómetro de martillo a algunos elementos estructurales, de los cuales decide usar para los materiales principales: la resistencia del concreto ($f'c$) para la cimentación y los muros de contención es de 21 MPa, para vigas, columnas, muros pantalla y placas es de 28 MPa (Ver tabla 1); en donde para el módulo de elasticidad del concreto (E_c) para estos elementos se calculó por la siguiente ecuación, debido a que la ciudad de Bucaramanga es abastecida con agregados de tipo metamórfico que generan un concreto de mejor calidad que el promedio nacional (NSR-10).

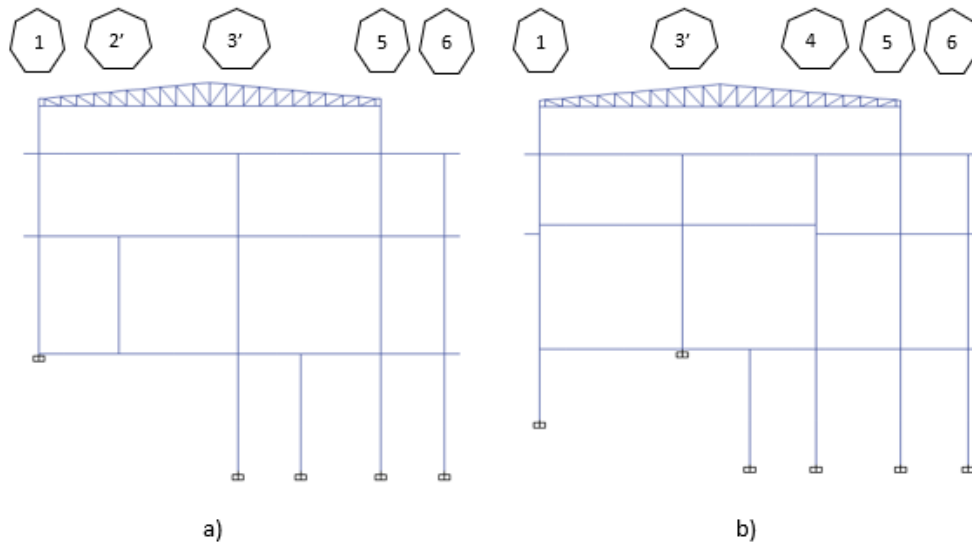
$$E_c = 4700 * \sqrt{f'c}$$

Tabla 1. Características del concreto.

$f'c$ [MPa]	E_c [MPa]
28	24870,06
21	21538,11

En la configuración geométrica de la estructura se encontró que se realizaron cambios estructurales en la etapa de construcción sobre el eje N, en la figura 6 se observa la comparación en la distribución de vigas y columnas del plano de diseño, con la configuración actual del pórtico y tenida en cuenta al momento del modelado en elementos finitos.

Figura 6. Comparación de vigas y columnas. a) Eje N diseñado inicialmente y b) Estado actual de la construcción.

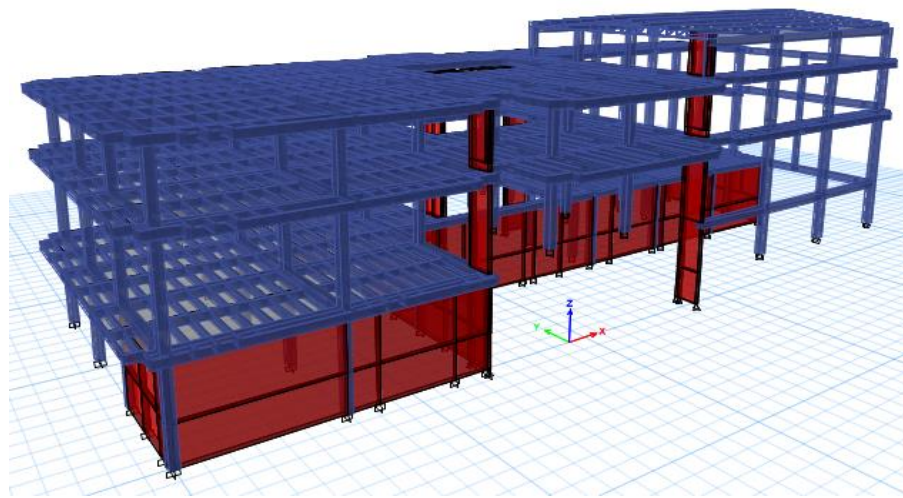


3. METODOLOGIA

3.1 MODELAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

El modelamiento numérico de la estructura se realizó en el software ETABS® 17 teniendo en cuenta los parámetros iniciales de diseño y las verificaciones encontradas, con los elementos estructurales que posee y la cubierta liviana en el sector Este del edificio (Ver figura 7). La cimentación de la estructura se modeló como elementos empotrados, sin tener en cuenta el comportamiento por las condiciones del suelo. Para la placa de entrepiso, no se consideró como diafragma por su irregularidad estructural en planta de tipo 3P.

Figura 7. Modelo numérico inicial



Fuente: ETABS 2017.

3.1.1 Cargas. Por ser un modelamiento numérico para identificar el estado actual de la estructura, solo es necesario suministrar las cargas debido al peso propio de la edificación y las cargas muertas. Teniendo en cuenta la densidad del concreto reforzado como 2.400 kg/m^3 y 7.800 kg/m^3 para el acero, permitiendo que el software calcule el peso propio de las columnas, vigas y muros estructurales, mientras que los demás elementos y cargas son aplicados manualmente.

Tabla 2. Cargas verticales suministradas.

Carga Verticales	[kN/m²]
Muros internos	2,5
Muros externos	2
Ventanería y puertas	0,45

Tabla 3. Cargas horizontales suministradas.

Carga Horizontales	[kN/m²]
Placa aligerada	4,43
Escalera	0,45
Cubierta escalera	0,15
Cubierta torre grúa	0,3

3.1.2 Parámetros dinámicos iniciales. El proceso de calibración del modelo numérico de la edificación se realiza ajustando las propiedades dinámicas de la frecuencia fundamental (eigenvalores) y los modos de vibración (eigenvectores) que se registran en la estructura, para ello se identifican las que posean mayor participación de masa en el modelo de elementos finitos. (WANG, Duan; HALDAR, Achintya, 1997).

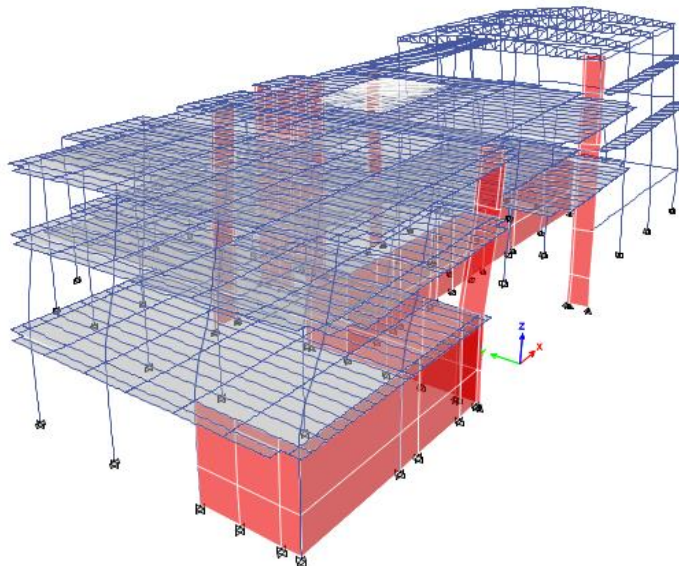
3.1.2.1 Frecuencias fundamentales y Modos de vibración. La frecuencia fundamental describe el comportamiento vibratorio de una estructura en su forma elástica. un modo de vibración corresponde a la forma de vibrar de la estructura en una frecuencia en particular (Ver tabla 4).

Tabla 4. Propiedades dinámicas identificadas en el modelo.

Modo	f [Hz]	T [s]	Masa efectiva [%]
X	4,096	0,244	33,06
Y	4,701	0,213	42,49
R	3,004	0,333	31,75

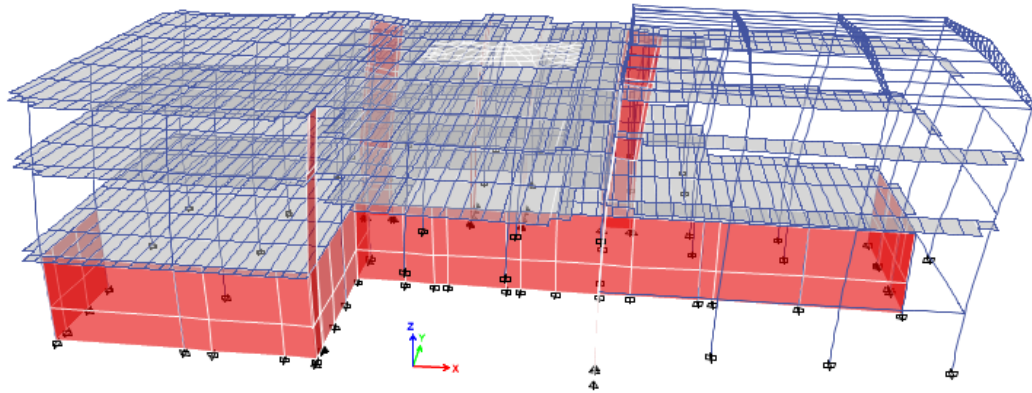
Se identificaron tres modos de vibración que contienen un alto porcentaje de participación de la masa de la estructura, por lo que se definen como los modos de vibración fundamental en la dirección X, en la dirección Y y torsional.

Figura 8. Modo inicial en torsión, $T=0.333$ s.



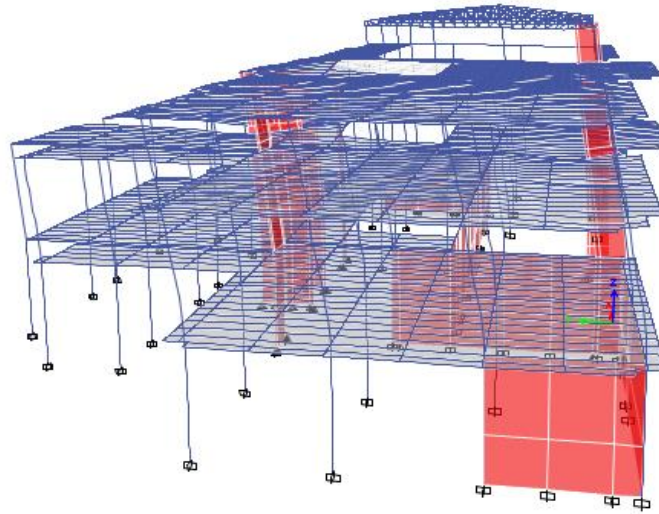
Fuente: ETABS 2017.

Figura 9. Modo inicial en dirección X, $T=0.244$ s.



Fuente: ETABS 2017.

Figura 10. Modo inicial en dirección Y, $T=0.213$ s.



Fuente: ETABS 2017.

3.2 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Se realizó una campaña experimental de toma de datos en etapa de funcionamiento de la estructura y se usó una configuración de ejes relacionados que contó con puntos de referencia global y local para identificar formas modales, a diferencia de una configuración de ejes independientes.

3.2.1 Equipo de adquisición de datos. Para la obtención de los registros de vibración ambiental de la edificación, se usaron tres acelerógrafos Obsidian de la marca Kinemetrics® con orientación ortogonal, equipados cada uno con sensor triaxial interno de alta sensibilidad y fuente balanceada suministrados por el grupo de investigación INME (Ver figura 11). Con un rango dinámico de 155 Db en un ancho de banda hasta de 200 Hz, un rango de escala completa de $\pm 2g$ a $\pm 4g$, Cuenta con sincronizador y localizador vía GPS, software proporcionado por Kinemetrics® para la verificación y extracción de datos y batería de 15,5 VDC recargable que facilita la portabilidad y acceso remoto de los equipos (Kinemetrics).

Figura 11. Sensor Obsidian

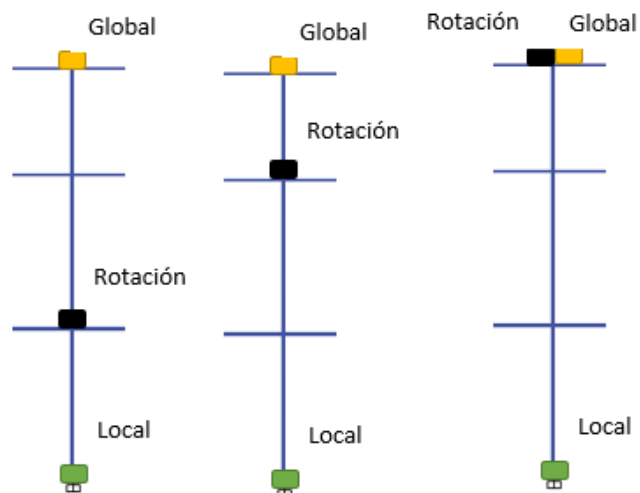


Fuente: Kinemetrics®.

3.2.2 Ubicación de sensores. La configuración de ejes acoplados consiste en detectar de forma simultánea el comportamiento del edificio en varios ejes (MURIÁ, David; GONZÁLEZ, Ricardo, 1995); para ello, es necesario mantener un sensor fijo de referencia que acople las mediciones, el cual fue ubicado en la azotea por ser el punto de mayor desplazamiento vertical y horizontal, otro sensor de referencia local que acople la información por ejes rotando en cada eje ubicado en el sótano rotado en cada eje vertical y el ultimo sensor va ser ubicado en las alturas con mayor desplazamiento.

En el modelo numérico inicial se detectaron tres modos de vibración fundamentales en la estructura (dirección X, Y y rotacional) que se suponen, son los que se van a registrar en la prueba experimental, además de ayudarnos en la ubicación vertical de los sensores en los pisos de mayor desplazamiento, identificados en los modos de vibración los valores máximos y valores cero. Pero por ser esta una edificación baja, se hace necesario y rápido su ubicación en todos los pisos, en la figura 3 se observan las 3 configuraciones verticales que lleva cada eje estudiado.

Figura 12. Configuración por ejes.



El centro de masas es el eje que mejor detecta las formas modales y por eso se usan configuraciones en él y alrededor, pero en este edificio el centro de masa se encuentra en el vacío de la escalera por lo que se hace imposible su medición, así que se designan 3 ejes verticales: uno cerca del centro geométrico que reúne mejor los desplazamientos en los 3 modos de vibración y dos a los extremos (Este y Oeste) por ser los lugares con mayor desplazamiento en el modo rotacional de la estructura (Ver figura 13).

Figura 13. Configuración en planta.



Fuente: Planos arquitectónicos existentes, suministrados por planta física.

3.2.3. Tiempo de medición. Las ventanas de tiempo de muestreo para cada medición se establecen intervalos no menores a 1.000 veces el periodo de vibración de la estructura (CANTIENI, Reto, 2005), mediante el modelo numérico inicial se pudo definir en 15 minutos, dando más tiempo del necesario para descartar interrupciones, movimientos abruptos cerca a los sensores y ruidos fuertes. Las mediciones se realizaron con una frecuencia de muestreo de 200 Hz (200 datos por segundo).

3.3 PROCESAMIENTO DE SEÑALES

El análisis de vibración es el primer paso para dar un concepto de salud estructural, el cual puede ser de dos tipos: Análisis modal experimental (Experimental Modal Analysis – EMA), el cual la excitación es inducida a la estructura por una fuerza conocida y pueden ser pruebas de vibración forzada o libre; El segundo, es un análisis modal operacional (Operational Modal Analysis –

OMA), la excitación a la estructura proviene del ambiente o actividades antrópicas, por lo cual no es medida y conocida como ruido blando, el cual es el más sencillo para medir la excitación en estructuras civiles. (GROSEL, Jacek; SAWICKI, Wojciech; PAKOS, Wojciech, 2014)

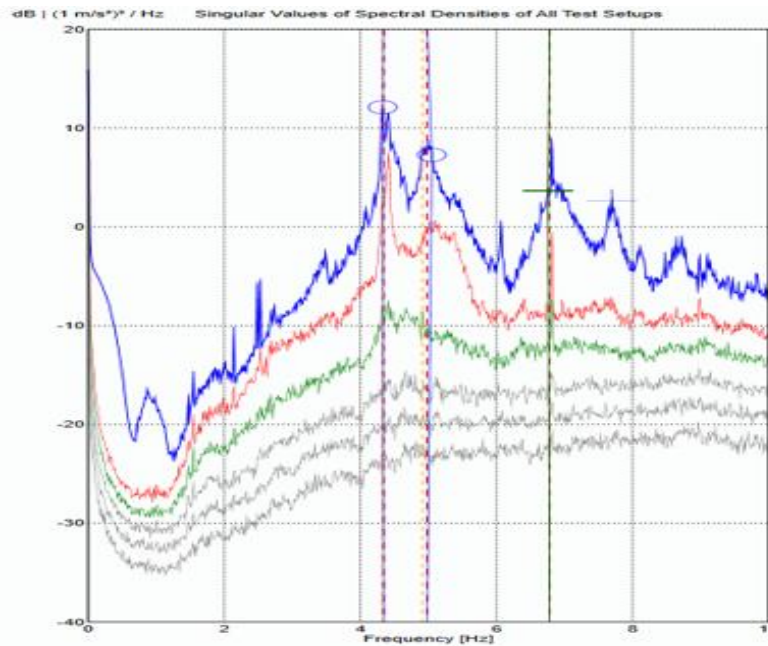
El análisis modal operacional son pruebas de vibración donde solo es medida la señal de salida (output-only), conocidas como pruebas de vibración ambiental (Ambient Vibration Test – AVT), las cuales son realizadas gracias a la excitación de la estructura producida por microsismos (terremotos, volcanes, oleaje oceánico, tormentas, etc.) y microtemblores (tráfico, vibraciones industriales, equipos sobre la estructura, etc.) (PARRA SAAVEDRA, Oscar Julián, 2013). Existen dos metodologías para identificar las vibraciones ambientales que se producen en la estructura: los métodos paramétricos en el dominio del tiempo y los métodos no paramétricos en el dominio de la frecuencia (VARGAS CARVAJAL, Laura Andrea, 2016). Este último basado en identificación modal solo en la señal de salida.

Se realizó la identificación de frecuencias fundamentales, modos de vibración y coeficiente de amortiguamiento de la estructura del caso de estudio por el método no paramétrico de Descomposición del Dominio de la Frecuencia Mejorado (Enhanced Frequency Domain Decomposition – EFDD), mediante la descomposición de la matriz espectral en valores singulares (SVD) de la matriz espectral (IVANOVIC, Sanja; TRIFUNAC Miahilo, 1995). El cual es el mejoramiento del método FDD, el cual extrae las frecuencias de resonancia y el amortiguamiento de un modo en particular y compara las funciones de auto correlación y correlación cruzadas. Aumentando la precisión de los parámetros dinámicos y permitiendo la identificación de frecuencias de resonancia muy próximas entre sí.

Los registros obtenidos por los sensores Obsidian son valores en unidad en Voltios a una frecuencia de 200 Hz, por lo que fue necesario utilizar el software Matlab® para disminuir la frecuencia, convertir los valores a aceleración en función del tiempo, corregir la línea de tendencia que pudo ser alterada por la mala nivelación de los equipos y ensamblar las matrices de espectro de 9 canales (3 sensores en 3 direcciones). Posteriormente se modeló la ubicación de los sensores en el software ARTeMIS Modal Pro 6.0 y se cargó la matriz espectral de vibración de la campaña experimental para detectar las propiedades dinámicas que se detectaron en la estructura con la configuración de sensores propuesta.

3.3.1 Identificación de frecuencias naturales. Para la identificación de frecuencias naturales, por el método EFDD del software ARTeMIS Modal Pro se asignó una frecuencia Niquist de 10 Hz para una muestra de 20 Hz, las funciones de densidad espectral creadas por el modelo se calcularon utilizando ventanas de Hanning de 1024 datos con traslapo entre ventanas del 66% (ARTeMIS Modal Pro v.6.0). En la figura 14 se muestran los valores singulares de la matriz espectral de la configuración medida, donde los picos más altos de los valores singulares del espectro representan las frecuencias naturales asociadas a la estructura (Anexo C).

Figura 14. Espectro de valores singulares.



Fuente: ARTeMIS Modal Pro.

En la tabla 5 se muestran las 3 frecuencias fundamentales asociadas a la estructura que se identificaron por el método EFDD.

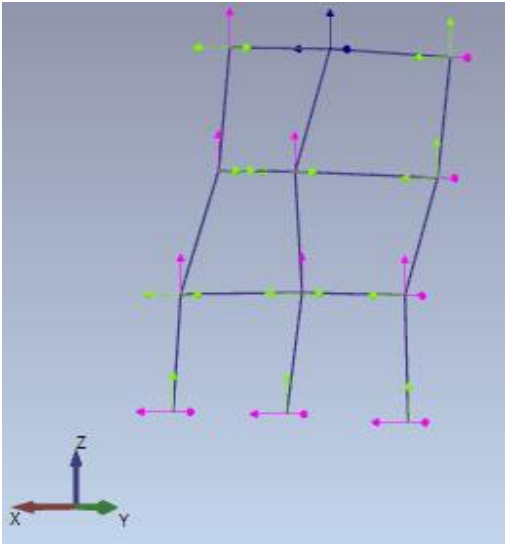
Tabla 5: Frecuencias identificadas.

Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
4,345	0,23015
6,781	0,14747
4,981	0,20076

3.3.2 Identificación de los modos de vibración. La matriz espectral descompuesta en valores singulares, da como resultado unos valores que corresponden a las frecuencias fundamentales que están relacionados a unos vectores singulares que corresponder a los modos de vibración; las frecuencias fundamentales que no arrojen una forma modal congruente son descartadas. A

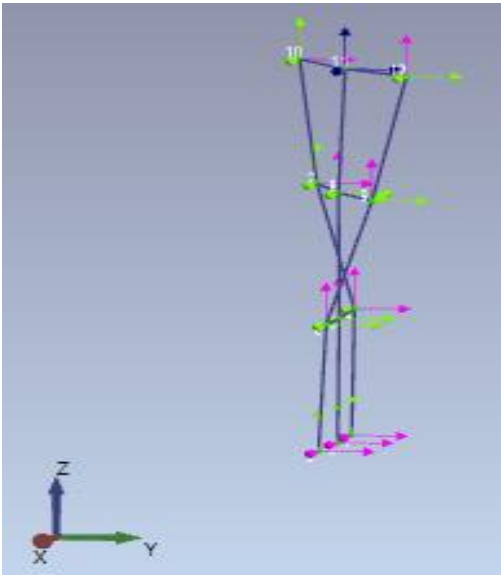
continuación, se presentan las formas modales asociadas a cada frecuencia fundamental (Ver figuras 15, 16, 17).

Figura 15. Modo 1, en dirección X ($T=0,23s$).



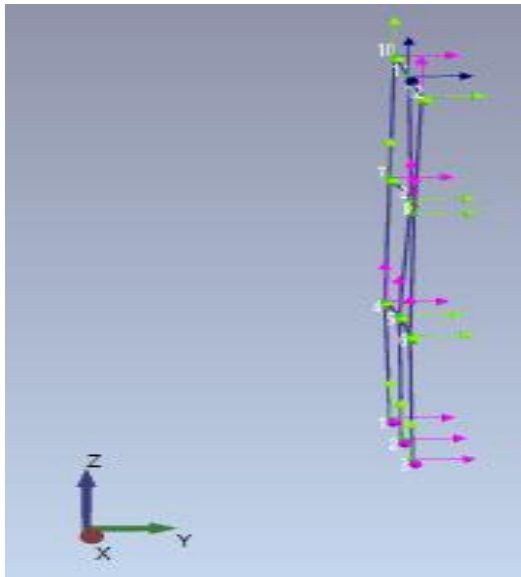
Fuente: ARTeMIS Modal Pro.

Figura 16. Modo 2, rotacional ($T=0,201s$).



Fuente: ARTeMIS Modal Pro.

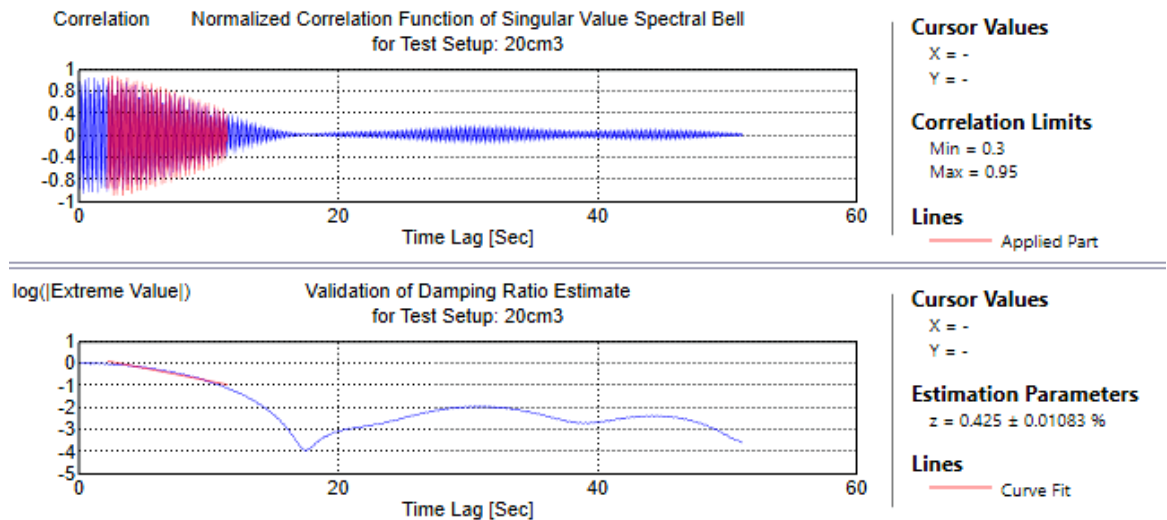
Figura 17. Modo 2, en dirección Y ($T=0,147s$).



Fuente: ARTeMIS Modal Pro.

3.3.3 Identificación de los coeficientes de amortiguamiento. El software ARTeMIS Modal Pro permite identificar los coeficientes de amortiguamiento para cada modo de vibración, identificando los extremos positivos y negativos de la función de correlación del decremento logarítmico que se ajusta a la recta, donde la pendiente de dicha recta corresponde al amortiguamiento. La tabla 6 muestra el porcentaje de amortiguamiento de la estructura perteneciente a cada frecuencia fundamental identificada, los cuales se encuentran en el rango permitido (inferior al 2%) aunque inferior al esperado. (GÓMEZ ARAUJO, Iván Diario, 2010).

Figura 18. Estimación para porcentaje de amortiguación en $f=0,435$ Hz, Modo X, setup 2.



Fuente: ARTeMIS Modal Pro.

Tabla 6. Coeficientes de amortiguamiento correspondiente a cada frecuencia fundamental.

Modo	Frecuencia [Hz]	ξ [%]
X	4,345	0,425
R	4,981	0,94
Y	6,781	0,064

3.3.4 Criterio de confianza modal. El criterio de confianza modal (Modal Assurance Criterion – MAC) es un criterio estadístico de comparación de dos formas modales, su valor se encuentra entre 0 y 1, donde valores cercanos o iguales a 1 indican formas modales consistentes y valores cercanos o iguales a 0 indican su total independencia o no correspondencia entre las formas modales que se están comparando (VARGAS CARVAJAL, Laura Andrea, 2016). En la figura 19 se observa la no correspondencia de los modos analizados.

Figura 19. Criterio MAC.

	4.345 Hz	4.981 Hz	6.781 Hz
4.345 Hz	1	0.2398	0.1813
4.981 Hz	0.2398	1	0.03268
6.781 Hz	0.1813	0.03268	1

Fuente: ARTEMIS Modal Pro.

3.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

La evaluación de la salud estructural sirve para prevenir la ocurrencia de daños que puedan hacer no deseable la edificación por los riesgos a la seguridad de las personas que la ocupan por medio de pruebas de vibración. La calibración del modelo numérico de la estructura es el primer paso para dar un concepto de la salud estructural, dando un comportamiento de las propiedades dinámicas y estimando las mecánicas por medio de pruebas no destructivas (RODRÍGUEZ FLORES, Domingo, 2016).

Teniendo el comportamiento y el estado actual de la edificación en un modelo calibrado y poder dar un concepto de salud estructural de nuestro caso de estudio, se sugiere continuar con:

- Una inspección visual por medio de peritaje para detectar daños puntuales que pueda tener la estructura y tenerlos en cuenta en el modelo calibrado.
- Un análisis lineal tiempo-historia, mediante sismos reales o simulados, donde se obtendrá el comportamiento de la estructura en el intervalo elástico.
- Un análisis estático no lineal (Pushover) con un patrón de cargas asociado a la superposición de los modos de vibración del edificio.

- Un análisis del comportamiento estructural ante un evento de gran magnitud.

O algunos otros criterios dependiendo del concepto, conocimiento y experiencia que tenga el investigador. Dando un concepto individual o global de los análisis realizados, concluyendo el estado de la edificación favorable o realizar las mejoras a tiempo y evitar afectaciones humanas y económicas que pueda ocasionar.

3.4.1 Estimación inicial. Para calibrar el modelo numérico se compararon los parámetros dinámicos asociados a cada dirección obtenidos en el modelo inicial, con los encontrados en las pruebas de vibración ambiental, por medio de un proceso inverso de mecánica, que consiste en modificar variables y parámetros de modelación hasta que la correlación entre las predicciones analizadas y los parámetros dinámicos experimentales se considera satisfactorio (MORASSI, Antonino; TONON, Stefano, 2008). En la tabla 7 se muestra la diferencia entre el modelo numérico inicial, con los detectados en la campaña experimental, donde se detecta una mayor rigidez de la edificación a la esperada teóricamente, por lo que es necesario modificar las propiedades de los materiales de los elementos estructurales y considerar el efecto de los elementos no estructurales.

Tabla 7. Comparación de frecuencias entre modelo numérico y campaña experimental.

Modo	Modelo [Hz]	EFDD[Hz]	Error [%]
X	4,096	4,345	5,73
Y	4,701	6,781	30,67
R	3,004	4,981	65,81

3.4.2 Modelo final. Para el proceso de calibración se tienen que tener en cuenta muchas variables como propiedades de materiales, cimentación, geometría,

cargas durante las pruebas. Por eso, la calibración se da de manera aproximada asignando criterios estimados (PACHECO R.; ORTÓZ, L.; GARCÍA, R., & ZERMEÑO, 2012).

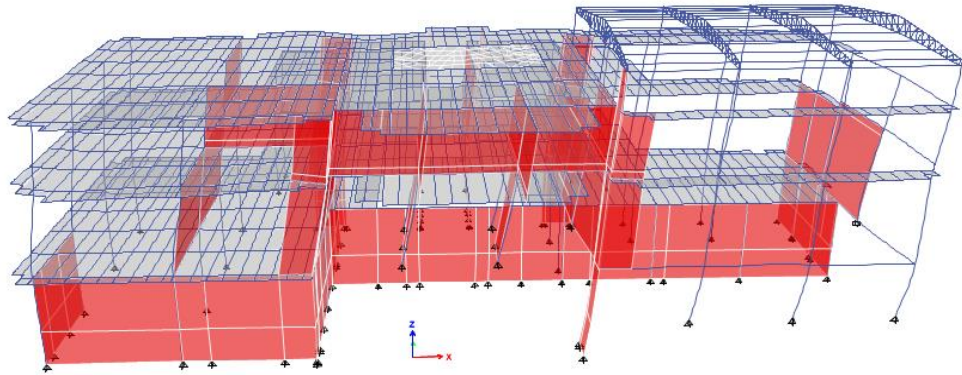
En la calibración de este modelo numérico se variaron las propiedades de los materiales, aumentó el módulo de elasticidad del concreto reforzado, además de simular algunos muros divisorios, según propiedades encontradas por VELANDIA PLATA, Edison; MARTINEZ MOSQUERA, José, 2019, que ayuden a aumentar la rigidez y así poder llegar a los periodos fundamentales de la estructura. En la tabla 8 de muestran las propiedades de los materiales estructurales y no estructurales que se variaron para la calibración aproximada del modelo.

Tabla 8. Comparación de propiedades mecánicas entre el modelo numérico inicial y el final.

Elemento	Propiedad	Valor Inicial	Valor Final
Columnas, vigas, placa y muros estructura	F'c	28 [MPa]	35 [MPa]
	Ec	24870[MPa]	27805[MPa]
Muros de contención	F'c	21 [MPa]	35 [MPa]
	Ec	21538[MPa]	27805[Mpa]
Muros en mampostería	F'c	0	1,6 [MPa]
	Em	0	1150[MPa]
	T	0	0,07 [m]

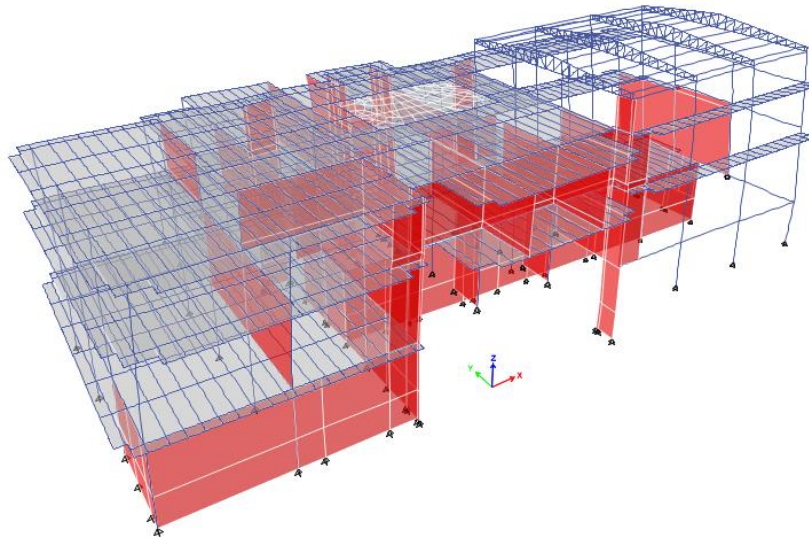
Se calibro la estructura del caso de estudio, para los tres primeros modos de vibración que posee y detectados en la campaña experimental, detectando el aporte de la mampostería central en dirección Y en la rigidez de la estructura (Anexo B).

Figura 20. Modo final en dirección X, $T=0.232$ s.



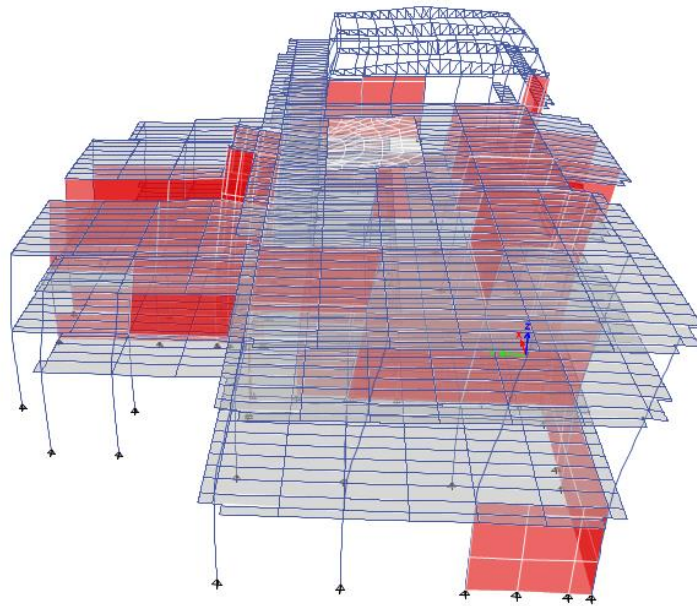
Fuente: ETABS 2017.

Figura 21. Modo final en torsión, $T=0.192$ s.



Fuente: ETABS 2017.

Figura 22. Modo final en dirección Y, $T=0.147$ s.



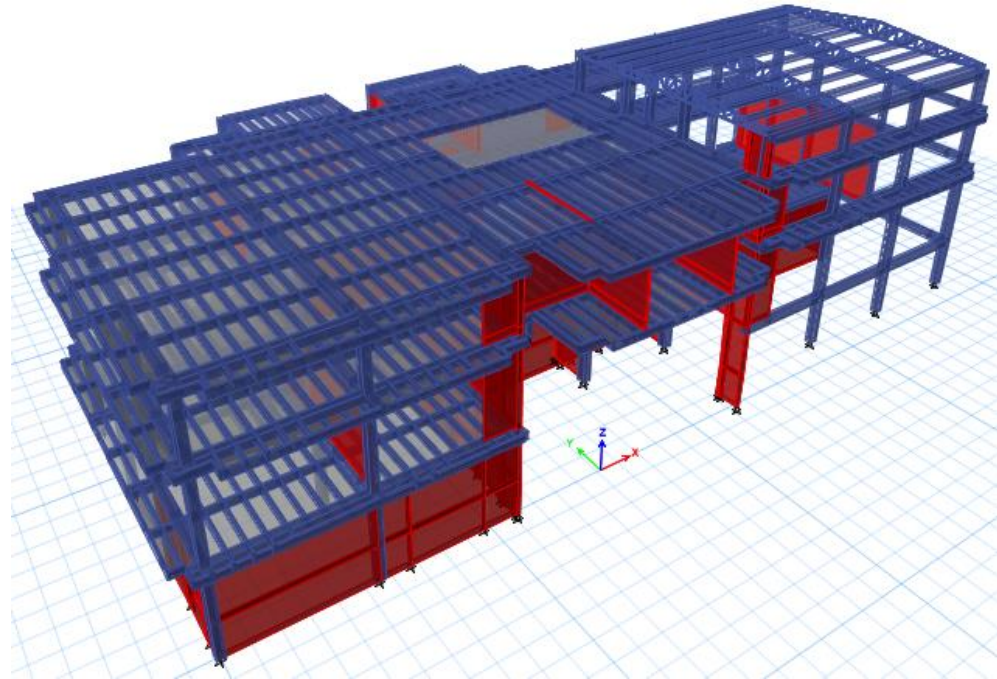
Fuente: ETABS 2017.

En la tabla 9 se reportan los valores de los parámetros de vibración ambiental en la campaña experimental (EFDD) y de los parámetros del modelo numérico (Modelo), obteniendo una diferencia aceptable.

Tabla 9. Tabla de resultados de las propiedades dinámicas del proceso de calibración.

Modo	Propiedad	EFDD	Modelo	[%]
X	f [Hz]	4,345	4,31	0,87
	T [s]	0,23	0,232	0,87
Y	f [Hz]	6,781	6,802	0,31
	T [s]	0,147	0,147	0,31
R	f [Hz]	4,981	5,102	2,49
	T [s]	0.201	0,192	2,49

Figura 23. Modelo numérico calibrado en el software ATABS 17.



Fuente: ETABS 2017.

Además de la campaña experimental echa para la calibración del modelo, se cuenta con 2 campañas adicionales echas por (Afanador Beltrán, Daniela; Gutiérrez Gómez, Andrea, 2018). en el año 2017 mediante ejes independientes y la segunda en el año 2018 mediante ejes acoplados, que ayudan a tener un registro histórico del comportamiento estructural, aportando más información que contribuye al futuro concepto sobre la salud estructural. Las 3 pruebas AVT se realizaron usando los mismos equipos y el mismo método de procesamiento de señales (Ver tabla 10).

Tabla 10. Comparación de los registros históricos.

Modo	Propiedad	2017	2018	2019
X	f [Hz]	4,484	4,327	4,345
	T [s]	0,223	0,2311	0,2301
	ξ [%]	1,589	0,571	0,425
Y	f [Hz]	6,803	6,893	6,781
	T [s]	0,147	0,1451	0,1475
	ξ [%]	1,355	1,471	0,064
R	f [Hz]	-	-	4,981
	T [s]	-	-	0,2008
	ξ [%]	-	-	0,94

4. CONCLUSIONES

La campaña experimental arrojó resultados similares a los encontrados en los proyectos anteriores. Pero en nuestro modelo, además se encontró el modo de vibración torsional gracias a la ubicación de los sensores en puntos extremos de la edificación. La exactitud del cálculo de los modos de vibración se podría haber mejorado con una mayor cantidad de puntos evaluados en la estructura, detectando un comportamiento completa de la edificación.

Se detectó una mayor rigidez en la edificación que la esperada, al calibrar el modelo numérico con las propiedades dinámicas obtenidas (EFDD) se detectó que las propiedades de los materiales del concreto son mayores que para el que fue diseñado, además de que la mampostería central en dirección Y ayuda en la rigidez de la estructura y tiene un aporte estructural.

Se logró un modelo numérico aproximado a las propiedades dinámicas actuales con un error menor a 1% en las direcciones principales y de 3% en el modo rotacional de la estructura.

5. RECOMENDACIONES

El modo de vibración designado al eje Y de la estructura, no es tan simétrico por haberse creado una configuración de un modelo plano de los sensores y solamente tener un eje en esa dirección. Se recomienda para futuras mediciones, realizar dos campañas experimentales:

- La primera como la realizada en esta metodología para identificar el modo rotacional, donde los extremos son los lugares de mayor desplazamiento en el modo rotacional.
- La segunda designando cinco ejes verticales, uno en el centro de masa o cerca de el y los otros alrededor, para identificar los modos en dirección X y Y donde se encuentra mayor simetría en los desplazamientos de los modos en las direcciones principales.

Continuar con la evaluación de la salud estructural de la edificación teniendo en como punto de partida el modelo calibrado en este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

AFANADOR BELTRÁN, Daniela y GUTIERREZ GOMEZ, Andrea. Análisis de daño en estructura de concreto a partir de la variación de sus propiedades dinámicas, 2018. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

AGREDO ACEVEDO, Hernan. Estudio de vulnerabilidad sísmica del edificio Álvaro Beltrán Pinzón – sede Uis, 2018. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

ARTEMIS Modal Pro® V.6.0. 2019. Structural Vibration Soluciones A/S.

CANTIENI, Reto. Experimental methods used in system identification of civil engineering structures. En Proceedings of the International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC). 2005. p. 249-260.

CEPAL, El terremoto de enero de 1999 en Colombia: Impacto socioeconómico del desastre en la zona del eje cafetero, Publicación CEPAL, 1999.

COMISIÓN ASESORA PERMANENTE PARA EL RÉGIMEN DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10, 2010. *Bogotá D.C.*

COTES RINCONES, Marcos y HOYOS LUNA, Ingrid. Estudio de vulnerabilidad sísmica del edificio Álvaro Beltrán Pinzón, 2016. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

ETABS ® v.17. 2016. Computer and Structure, CSI.

GÓMEZ ARAUJO, Iván Diario. Caracterización dinámica experimental de puentes de hormigón simplemente apoyados a partir de mediciones de vibración ambiental. 2010. Tesis Doctoral. Tesis para lograr el título de Maestría en Ingeniería Civil, Directora: Dra. Esperanza MaldonadoRondón, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

GROSEL, Jacek; SAWICKI, Wojciech; PAKOS, Wojciech. Application of classical and operational modal analysis for examination of engineering structures. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 91, p. 136-141.

IVANOVIC, Sanja y TRIFUNAC Miahilo. Ambient vibration sarveys of full-scale structure using personal computers – example for kaprielian hall, University of Southern California. 1995. Los Angeles, California, Estados Unidos de America.

JARAMILLO, Andrés. Hospital del IESS de Manta quedo inservible tras el terremoto en Ecuador. *El Comercio*, 17 de abril de 2016.

KINEMATRICS. Datasheet manual Obsidian accelerograph kinematics, 2015. (Recuperado el 10 de Agosto de 2019). Disponible en: <http://www.kinematics.com/>.

LÓPEZ TAGLE, Elizabeth; SANTANA NAZARIT, Paula. El terremoto de 2010 en Chile: respuesta del sistema de salud y de la cooperación internacional. *Revista Panam Salud Pública*, 2011. p. 30(2)160-6.

MORASSI, Antonino; TONON, Stefano. Dynamic testing for structural identification of a bridge. *Journal of bridge engineering*, 2008, vol. 13, no 6, p. 573-585.

MURIÁ, David; GONZÁLEZ, Ricardo. propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. Revista de Ingeniería Sísmica, 1995, no 51, p. 25-45.

NÁJAS, Alberto. Sismo de 2017 en México: Las lecciones no aprendidas que dejó el terremoto del 19 de septiembre, BBC News Mundo, Ciudad de México. 2018. (Recuperado el 20 de agosto 2019). Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-45544734>

PACHECO R.; ORTÓZ, L.; GARCÍA, R., & ZERMEÑO. Las vibraciones como una fuente para evaluar el comportamiento estructural de edificios patrimoniales. XVII congreso nacional de ingeniería estructural (págs. 1-7). 2012. Guerrero: sociedad mexicana de ingeniería estructural, Acapulco

PARRA SAAVEDRA, Oscar Julián. El Uso De Microtemblores En La Caracterización Dinámica De Edificaciones. 2003. Tesis Doctoral. Universidad Industrial de Santander, Escuela De Ing. Civil.

RODRÍGUEZ FLORES, Domingo, et al. Evaluación de salud estructural de un edificio de acero. 2016. Tesis de Maestría. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

RODRIGUEZ SÚNICO, Manuel. Análisis modal operacional: Teoría y Práctica. Escuela superior de Ingenieros. Universidad de sevilla, 2005.

VARGAS CARVAJAL, Laura Andrea. Propuesta De Plan De Monitoreo Del Comportamiento Dinamico Para La Salud Estructural Del Nuevo Puente Gomez Ortiz En La Via Giron-Zapatoca. 2016. Tesis Doctoral. Universidad Industrial de Santander, Escuela De Ing. Civil.

VELANDIA PLATA, Edison y MARTINEZ MOSQUERA, José. Efecto de los muros de mampostería de relleno sobre la respuesta sísmica de estructuras aporricadas de concreto reforzado. 2019. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

WANG, Duan; HALDAR, Achintya. System identification with limited observations and without input. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, vol. 123, no 5, p. 504-511.