

Caracterización estructural de zonas de acceso a edificaciones educativas utilizando mediciones de vibraciones

Structural characterization of access areas to educational buildings using vibration measurements

Cristian Moreno ^{1a}, Wilson Hernández ^{1b}, Gustavo Chio-Cho ^{1c}, Alvaro Viviescas ^{1d}, Carlos Alberto Riveros-Jerez ²

¹ Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Orcid: 0000-0002-4806-1289 ^b, 0000-0003-4766-9759 ^c, 0000-0003-0052-8801 ^d. Correos electrónicos: Cristian.moreno@correo.uis.edu.co ^a, wilson2198182@correo.uis.edu.co ^b, gchioch@uis.edu.co ^c, alvivija@uis.edu.co ^d

² Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. Orcid: 0000-0002-7128-4165. Correo electrónico: carlos.riveros@udea.edu.co

Recibido: 12 septiembre, 2023. Aceptado: 16 diciembre, 2023. Versión final: 2 marzo, 2024.

Resumen

Un gran número de edificaciones educativas de universidades públicas colombianas requieren con urgencia intervenciones de reforzamiento estructural. Sin embargo, por las consideraciones de urbanismo de la gran mayoría de las ciudadelas universitarias, estas edificaciones educativas se encuentran separadas entre sí por zonas verdes y estructuras de acceso, donde estas últimas se caracterizan generalmente por falta de información en sus condiciones de contorno y propiedades de los materiales, con el agravante que en muchos casos se encuentran conectadas estructuralmente con edificaciones educativas. Este artículo presenta una metodología de caracterización estructural de una estructura de acceso de edificaciones educativas localizada en la sede de la Universidad Industrial de Santander. Pruebas en campo de vibración ambiental permiten estudiar la influencia de las condiciones de contorno. Finalmente, la implementación de un algoritmo de óptima localización de sensores y pruebas numéricas de vibración forzada permiten validar la consistencia de la metodología propuesta en este artículo.

Palabras clave: vibración ambiental; vibración forzada; simulaciones numéricas; óptima ubicación de sensores; actualización modelo numérico.

Abstract

Many educational buildings of Colombian public universities urgently require structural reinforcement interventions. However, due to the urban planning considerations of most university campuses, these educational buildings are separated by green areas and access structures. In contrast, the latter is generally characterized by a lack of information on their boundary conditions and material properties, with the aggravating circumstance that, in many cases, they are structurally connected to educational buildings. This article presents a methodology for the structural characterization of an access structure for educational buildings located at the headquarters of the Industrial University of Santander. Ambient vibration field tests allow for studying the influence of boundary conditions. Finally, implementing an

algorithm for the optimal location of sensors and numerical tests of forced vibration enables validation of the consistency of the methodology proposed in this article.

Keywords: ambient vibration; forced vibration; optimal sensor placement; numerical simulation; numerical model updating.

1. Introducción

La infraestructura educativa de universidades públicas colombianas por lo general obedece al modelo de edificaciones aisladas donde operan diferentes dependencias que se comunican entre sí por zonas verdes y corredores de acceso, en donde algunos de estos corredores corresponden a estructuras con cubiertas pesadas. Según el Reglamento de Construcción Sismo Resistente NSR-10 [1], la infraestructura educativa pertenece al grupo de edificación indispensable, sin embargo, un gran porcentaje de esta infraestructura supera los 50 años de funcionamiento y por tal motivo requiere intervenciones urgentes de reforzamiento estructural para garantizar un comportamiento acorde a su grupo de clasificación. En este sentido, las actividades de estudio de respuesta estructural e instrumentación de infraestructura educativa, en el contexto nacional, se han centrado principalmente en edificaciones educativas, donde recientemente se han realizado estudios de instrumentación estructural que permiten mejorar los enfoques de reforzamiento estructural invasivos comúnmente usados en la práctica, predominando el uso de modelos numéricos que no son dinámicamente calibrados con mediciones de vibraciones en campo. Sin embargo, edificaciones educativas con configuraciones irregulares y diferentes sistemas estructurales requieren de un alto nivel de criterio ingenieril en la determinación del desempeño con base en modelos numéricos [2].

Las zonas de acceso con cubiertas pesadas en sedes universitarias representan estructuras sensibles por ser rutas de evacuación de edificaciones educativas y si no se garantiza su estabilidad estructural durante un evento sísmico se pueden presentar afectaciones importantes en términos de colapso estructural, incluso generando daños estructurales a las edificaciones educativas que conectan. Este aspecto es importante porque, debido a la falta de información de la construcción de estas estructuras de acceso, se conciben como estructuras aisladas, pero por falta de supervisión adecuada o por procedimientos subjetivos de diseño, en algunos casos, se vinculan estructuralmente con edificaciones educativas. Adicionalmente, por limitaciones económicas, los reforzamientos estructurales se realizan de forma independiente para cada edificación por lo que es común encontrar en una misma ciudadela universitaria, edificaciones con importantes deficiencias estructurales, edificaciones con reforzamiento estructural reciente en

cumplimiento de la normativa vigente y edificaciones nuevas que han reemplazado edificaciones que por su deterioro estructural o la necesidad de nuevos espacios han sido demolidas en su totalidad.

En línea con el problema anteriormente descrito, se requieren de enfoques que permitan mejorar los procedimientos de caracterización estructural, que complemente la falta de información en materiales y condiciones de contorno estructural de estas estructuras de acceso con cubiertas pesadas. Por tal motivo, distintas técnicas para el monitoreo de la salud estructural se han desarrollado y aplicado ampliamente a nivel mundial como lo expone [3] siendo la técnica más aplicada aquellas basada en vibraciones como los son las pruebas dinámicas de vibración ambiental y forzada que consisten, básicamente, en registrar las aceleraciones producidas por las estructuras ante diversas fuentes de excitación y extraer de estas señales los parámetros modales como frecuencias naturales, formas modales y porcentaje de amortiguamiento con diversos ejemplos a nivel internacional reportados por [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]. Aunque el uso de fuentes artificiales mejora en algunos casos la detección de algunas formas modales, adicionales a las identificadas en pruebas de vibración ambiental, su aplicación está limitada por la cantidad de energía que puede suministrar a la estructura ya que depende directamente de la masa a excitar; caso contrario sucede en las pruebas de vibración ambiental, que aunque son de amplio uso para distintas tipologías y tamaños de estructuras, están limitadas por la magnitud y frecuencia de la señal de entrada que no siempre excita los modos de vibración con mayor participación de masa.

Una experiencia en la ejecución de pruebas de vibración forzada en un edificio educativo construido en 1976 fue reportada por [11] con la instalación de un dispositivo mecánico en un muro perimetral del foso del ascensor que permitió la aplicación de una fuerza variable hasta 40 kN en la dirección longitudinal del edificio. Adicionalmente y de forma complementaria a las pruebas dinámicas, se ejecutaron pruebas no destructivas con cámara infrarroja, esclerometría y detección de varillas de refuerzo mediante pacómetro con el objetivo de validar el desempeño antes y después del reforzamiento estructural de la edificación. Por otro lado, instituciones educativas en las que se pone en duda la integridad estructural luego de eventos extremos de gran magnitud han sido objeto de proyectos de reforzamiento estructural

como lo documenta [12] con un enfoque basado en la variación de las propiedades dinámicas antes y después del reforzamiento estructural, en este estudio en particular, el edificio de concreto reforzado seleccionado para el caso de estudio tenía una resistencia promedio $f'c$ de 15.41 MPa (inferior al mínimo permitido por NSR-10: 17 MPa). Es importante notar que este valor de $f'c$ fue obtenido con base en estudios de patología estructural. Finalmente, luego del proceso de reforzamiento se identificaron variaciones en periodos de vibración de hasta 23.1% con respecto al estado inicial. En otro estudio reciente fue posible determinar el módulo de elasticidad del concreto ($f_{cm} = 19.71$ MPa) con base en ensayos destructivos realizados en un edificio escolar previo a su aislamiento sísmico mediante amortiguadores viscosos [13]. Mediante la ejecución de pruebas AVT (Ambient Vibration Test) se identificaron variaciones de hasta 18% en las propiedades dinámicas antes y después de la implementación del sistema de aislamiento. Estas investigaciones han mostrado un patrón en común en la que se asume que el modelado numérico antes y después del reforzamiento estructural, utilizando propiedades mecánicas y geométricas de los materiales y distribución de refuerzo estructural de ensayos realizados en campo, no es suficiente para garantizar que el modelo numérico está calibrado previo a la implementación de estrategias de reforzamiento estructural. En este sentido, las pruebas de vibración garantizan mejor calibración de modelos numéricos por cuanto complementan y permiten optimizar la información obtenida de ensayos de campo.

Los instrumentos de medición por excelencia para este tipo de campañas resultan ser acelerómetros en donde la ubicación de estos juega un rol importante, esto por motivos económicos en los que no se puede instrumentar toda la estructura, por lo que resulta útil establecer posiciones estratégicas de los instrumentos a fin de obtener la mayor información dinámica posible lo que ayuda a reducir el volumen de información a procesar disminuyendo así el costo en equipos de instrumentación y duración de campañas experimentales. Un método de amplio uso para este objetivo es el Método de Independencia Efectiva (EI) desarrollado por [14]. En general las formas modales objetivo se seleccionan de estudios preliminares basados en modelos numéricos no calibrados donde hay una gran incertidumbre, o en el mejor de los casos, se usan modelos calibrados con pruebas de vibración realizadas en campo, estos últimos ofrecen mayor confiabilidad y representan de forma más aproximada la respuesta dinámica de la estructura. Para optimizar estas ubicaciones se debe identificar exactamente el número mínimo de sensores que permiten caracterizar las formas modales de interés.

En resumen, el objetivo de la óptima ubicación de sensores es minimizar el número de sensores y ubicarlos adecuadamente para obtener una estimación adecuada de las formas modales de interés lo que redundará en una aminoración del tiempo de ejecución de las pruebas de vibración ambiental disminuyendo de esta forma su costo. Es importante resaltar que en las investigaciones reportadas por [11], [13] se ubicaron los acelerómetros sin estimar posiciones estratégicas para la instrumentación. Por tal motivo, un paso fundamental en la caracterización dinámica resulta ser el modelado numérico previo que proporciona datos dinámicos de referencia respecto a los valores de frecuencias esperados en campo y que luego este puede ser ajustado en función de la información identificada. Este proceso de ajuste del modelo permite establecer un punto de control para eventos extremos futuros junto con la evaluación de la condición estructural actual.

El procesamiento de la información es un paso crítico destinado a la mitigación de errores y principalmente, la estimación de parámetros dinámicos. Para ello, se han desarrollado diversas técnicas en función del tiempo o frecuencia como lo reportan [15]. El enfoque de caracterización estructural de estructura de acceso con cubierta pesada, parte de un modelo numérico preliminar que se ajusta con datos proporcionados del levantamiento en campo de la estructura de acceso y dos pruebas de vibración ambiental usando distintas configuraciones de ubicación de sensores para estudiar la influencia de las condiciones de contorno. Una primera prueba de vibración ambiental AVT utiliza una configuración de sensores concentrada en la zona más alejada de la condición de contorno más relevante. Una segunda prueba de excitación ambiental utiliza una configuración de sensores a lo largo de la estructura de acceso sin tener en cuenta la posible afectación de la respuesta estructural por la falta de información de contorno de la estructura. La implementación de un algoritmo para la óptima ubicación de sensores permite una segunda calibración del modelo numérico.

2. Caso de estudio

El caso de estudio corresponde a una estructura de acceso con cubierta pesada (Figura 1) donde el tramo de interés tiene una longitud de circulación de 16.5 m, un ancho de 2.75 m, y un espesor de placa de 0.25 m (Figura 2). Las columnas de apoyo son en perfiles circular metálica con un diámetro de 90 mm, espesor de 4 mm y separación entre columnas de 4 m.



Figura 1. Estructura de acceso. Fuente: elaboración propia.



Figura 2. Vista lateral de la estructura de acceso. Fuente: elaboración propia.

No se encontraron planos estructurales de la placa por lo que los modelos numéricos y demás análisis fueron producto de un levantamiento topográfico “in situ”. La cara superior de la placa no estaba recubierta con material adicional tipo aislante o impermeabilizante.

2.1. Modelo numérico

Para efectos de modelado se considera solo la parte de la estructura de acceso que se conecta frontalmente con el edificio educativo y que consiste en 4 ejes de pares de columnas. El modelo de Elementos Finitos (EF) de la estructura de acceso se realizó en midas CIVIL© considerando una resistencia a compresión del concreto de 17.5 MPa y acero A-36 para columnas circulares según se ilustra en la Figura 3. Para considerar el aporte en masa del segundo tramo escalonado se incluyó la masa aferente de la losa adyacente a la estudiada. En cuanto a las condiciones de apoyo de las columnas, estas se asumieron tipo empotramiento perfecto, aunque en los costados perimetrales de la placa dichas caras están en

contacto nulo o parcial con la estructura adyacente lo que sugiere ciertas condiciones de apoyo especial (Figura 4) que no pueden establecerse a priori de las campañas experimentales. Este aspecto es de importancia porque las inspecciones de campo deben en lo posible evitar intervenciones invasivas, en este caso en particular, las adecuaciones arquitectónicas posteriores con elementos de recubrimiento impiden visualizar el tipo de conexión de la estructura de acceso con el edificio.

Para los primeros análisis numéricos se estimaron 4 condiciones de apoyo (Figura 5) considerando que el tramo izquierdo (Figura 2) estaba en voladizo, la conexión únicamente limitaba desplazamiento en las 3 direcciones, restringido únicamente en dirección vertical y que la conexión con el edificio educativo adyacente correspondía a unión monolítica. Estas consideraciones de apoyo están sujetas a modificaciones a razón de la calibración del modelo de EF respecto las propiedades identificadas experimentalmente.

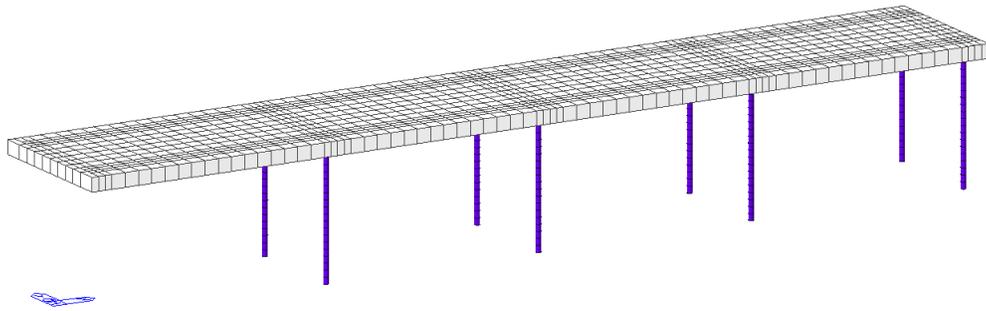


Figura 3. Modelo numérico tramo de interés. Fuente: elaboración propia.

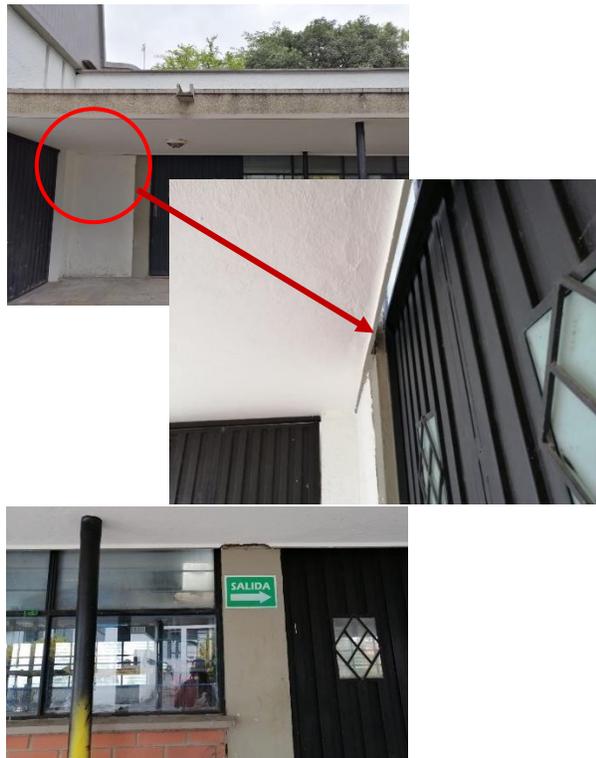


Figura 4. Zonas de contacto entre estructura de acceso y edificaciones educativas adyacentes. Fuente: elaboración propia.

Las propiedades dinámicas de los 4 modelos preliminares desarrollados se muestran en la **Tabla 1**, en la que se presentan los resultados ordenados en función de la dirección principal del modo de vibración, es de notar cambios importantes en los modos longitudinal y transversal dependiendo de las condiciones de apoyo asumidas.

2.2. Campaña de vibración ambiental AVT 1

Como paso inicial para la calibración del modelo de EF se ejecutó una campaña experimental de vibración

ambiental con instrumentación ubicada en los dos vanos más alejados de la zona de conexión frontal con el edificio educativo con el objetivo de estudiar la influencia de la zona de contorno. Para tal objetivo, se definieron 9 configuraciones de localización de sensores con 20 minutos de medición en cada ubicación según se ilustra en la **Figura 6**.



Figura 5. Condiciones de apoyo preliminares. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Propiedades dinámicas modelo numérico

| Dirección | Frecuencia [Hz] | | | |
|-----------|-----------------|--------|---------|---------|
| | COND 1 | COND 2 | COND 3 | COND 4 |
| X | 0.9683 | 38.95 | 0.9668 | 1.0825 |
| Y | 1.05859 | 4.1331 | 1.051 | 1.0528 |
| Z | 23.1585 | 21.149 | 21.1498 | 21.1495 |

2.2.1. Procesamiento de señales de la campaña AVT 1

A través de la técnica EFDD (Enhanced Frequency Domain Decomposition) de la librería de ARTEMIS© se extrajo el espectro de potencia para el conjunto de señales dados. Se observan picos poco pronunciados y de bajo contenido energético (**Figura 7**), lo que sugiere, en primera instancia que los resultados no son del todo concluyentes. Además, comparando las formas modales de los picos identificados mediante el índice MAC [16] son ampliamente consistentes lo que sugiere que son modos repetidos (**Figura 8-Tabla 2**).

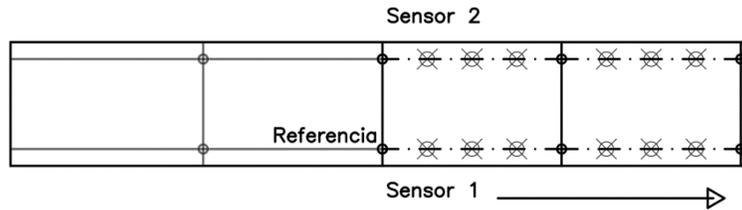


Figura 6. Ubicación esquemática sensores.

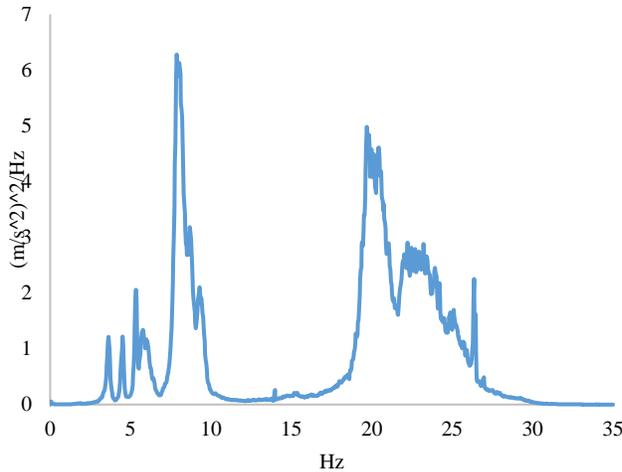
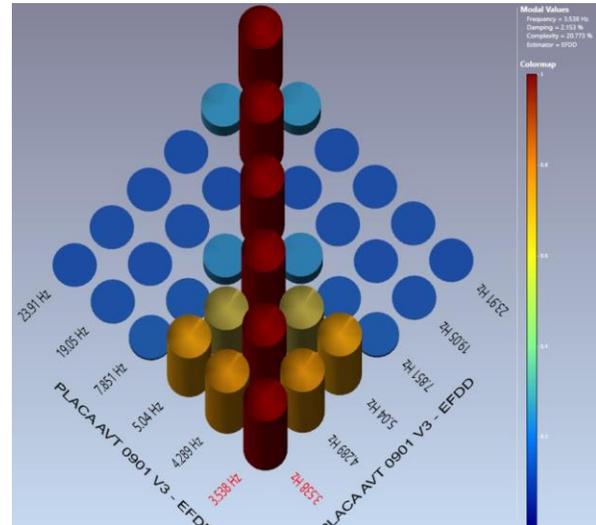
Figura 7. Espectro respuesta de frecuencia campaña 1.
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Índice MAC campaña 1. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Índice MAC campaña 1

| | 3.538 Hz | 4.289 Hz | 5.04 Hz | 7.851 Hz | 19.05 Hz | 23.91 Hz |
|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 3.538 Hz | 1.000 | 0.828 | 0.786 | 0.034 | 0.008 | 0.000 |
| 4.289 Hz | 0.828 | 1.000 | 0.595 | 0.017 | 0.001 | 0.005 |
| 5.04 Hz | 0.786 | 0.595 | 1.000 | 0.155 | 0.005 | 0.001 |
| 7.851 Hz | 0.034 | 0.017 | 0.155 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 19.05 Hz | 0.008 | 0.001 | 0.005 | 0.000 | 1.000 | 0.192 |
| 23.91 Hz | 0.000 | 0.005 | 0.001 | 0.000 | 0.192 | 1.000 |

2.2.2. Calibración del modelo de EF campaña AVT 1

El siguiente paso corresponde a la calibración del modelo numérico a partir de los resultados de la campaña 1. Como parámetro de calibración se tomó el índice MAC y porcentaje de error relativo de frecuencia. El proceso de calibración y/o actualización del modelo numérico consiste en ajustar las propiedades mecánicas de los materiales, geométricas de la sección o condiciones de contorno al parámetro de referencia que para este caso corresponde a 4 formas modales con mayor participación de masas para un rango de frecuencias entre 3.451-5.697Hz (modo longitudinal), 7.487 – 8.887Hz (modo transversal), 18.685 – 19.596 (primer modo vertical) y 23.73 – 25.195 (segundo modo vertical). La calibración

a partir de propiedades mecánicas de los materiales hace referencia a modificaciones en módulos de elasticidad, propiedades geométricas que consisten en aumentar o disminuir la inercia de la sección transversal del elemento y en el caso de condiciones de contorno ajustar las condiciones de apoyo ya sea definiendo empotramiento o articulación del nodo o adicionar resortes elásticos a fin de simular un apoyo más complejo.

Para el caso que compete en esta investigación, se hizo un análisis inicial de la coherencia de las formas modales numéricas respecto las experimentales encontrando consistencia mínima respecto los valores de referencia lo que indica que el parámetro inicial de calibración debe estar relacionado con las condiciones de contorno ya que

estás modifican la ondulación del modo. En cuanto los valores de frecuencia estos se ajustan aumentando o reduciendo la rigidez de la estructura ya se modificando la sección transversal del elemento o el módulo de elasticidad del material.

En primer lugar, se analizó el índice MAC y porcentaje de error relativo de frecuencia de los modelos preliminares elaborados encontrando altas inconsistencias por lo que se adicionaron restricciones tipo resorte en ciertas ubicaciones como lo sugiere la Figura 5; estas modificaciones del contorno se observan en la Figura 9. La modificación aleatoria de la rigidez de los resortes añadidos en los nodos seleccionados entre 100 y 10000 en potencias de 10 constituyó la metodología de calibración pasando de una consistencia modal de 0.4 a 0.82 en el mejor ajuste (Figura 10) y disminución del porcentaje de error relativo de la frecuencia fundamental (Figura 11). El bajo ajuste de los modos verticales puede relacionarse a dos factores: la pobre excitación en esa dirección y a no instrumentar la totalidad de la placa. Estas consideraciones fueron tomadas para las siguientes campañas experimentales.

2.3. Campaña de vibración ambiental AVT 2

Con el objetivo de caracterizar la respuesta dinámica de la totalidad de la placa, se realizó una campaña experimental de vibración ambiental ubicando los acelerómetros como lo muestra la Figura 12 (de extremo norte a sur de la placa) en 9 configuraciones de equipos con registros de medición de 20 minutos cada uno. Los sensores se ubicaron cada L/4 de luz entre apoyos.

2.3.1. Procesamiento de señales de la campaña AVT 2

Usando la herramienta ARTEMIS se extrajeron los parámetros dinámicos de los registros de aceleraciones para esta campaña experimental, utilizando la técnica FDD se evidencia un espectro de frecuencias con 6 picos diferenciables de los cuales, solo 3 frecuencias corresponden a modos claramente identificables de la estructura, los demás picos identificados tenían similitud con otras formas modales como lo muestra la Figura 13 (Tabla 3 con valores numéricos de índice MAC Figura 13).

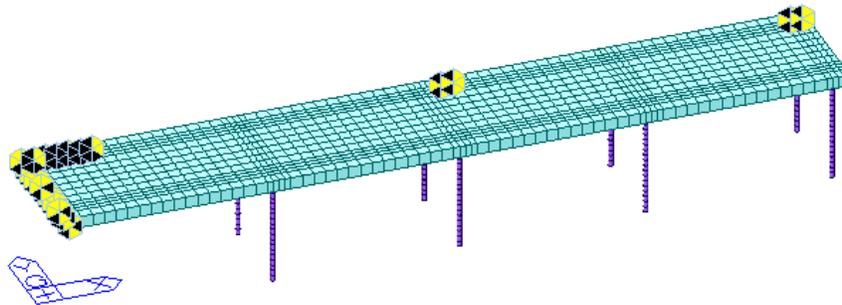


Figura 9. Modelo numérico con posiciones de resorte. Fuente: elaboración propia.

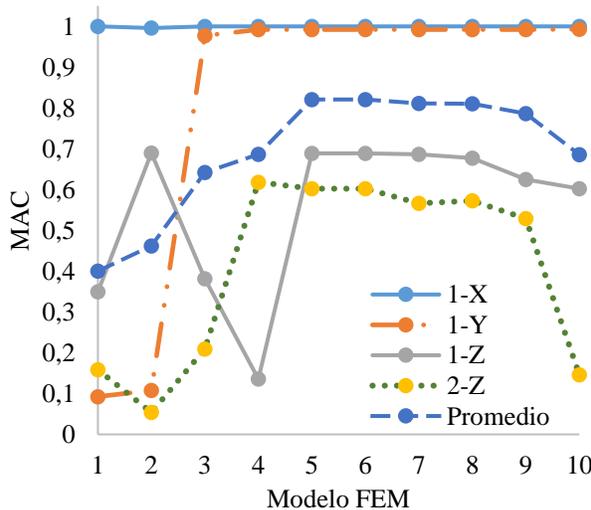


Figura 10. Índice MAC calibración preliminar.

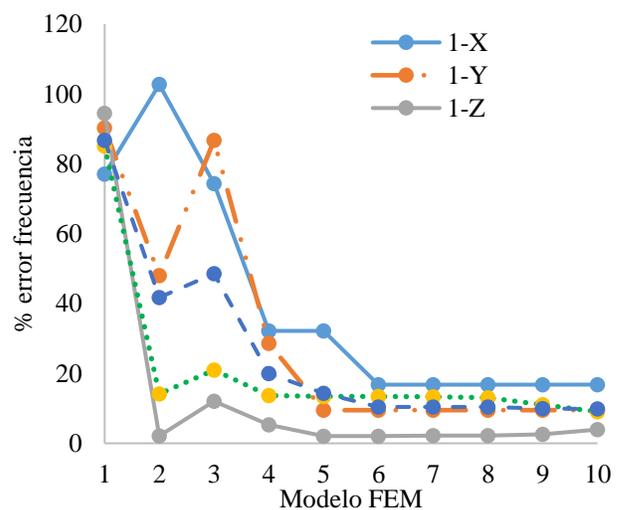


Figura 11. Porcentaje de error relativo.

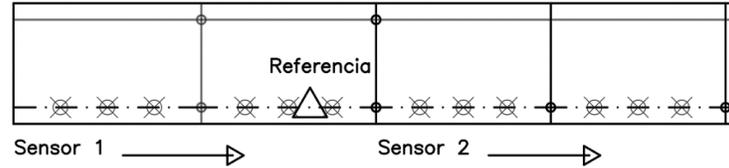


Figura 12. Ubicación esquemática de sensores. Fuente: elaboración propia.

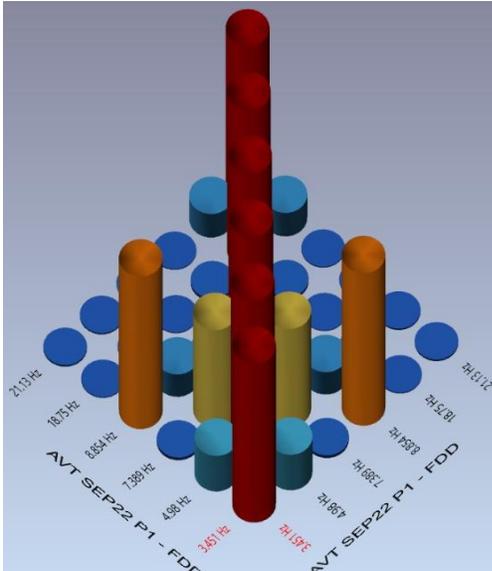


Figura 13. Índice MAC campaña AVT 2.2. Fuente: elaboración propia.

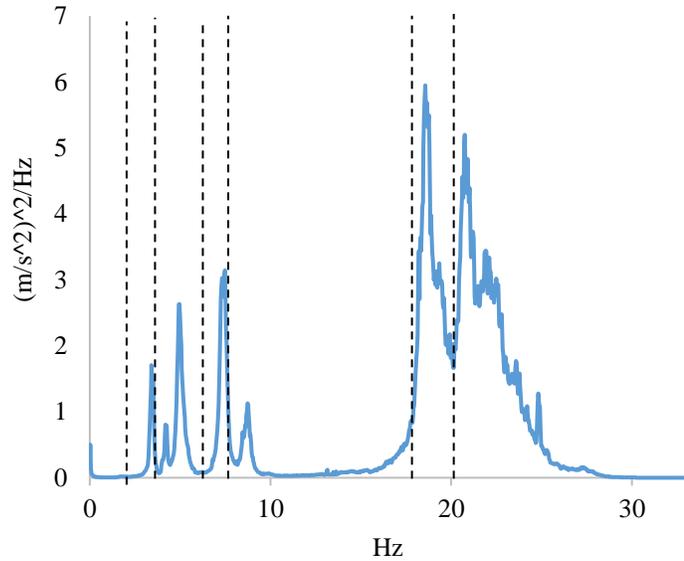


Figura 14. Espectro potencia de frecuencias campaña 2. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Índice MAC campaña AVT 2

| | 3.451 Hz | 4.98 Hz | 7.389 Hz | 8.854 Hz | 18.75 Hz | 21.13 Hz |
|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|
| 3.451 Hz | 1.000 | 0.224 | 0.018 | 0.960 | 0.007 | 0.011 |
| 4.98 Hz | 0.224 | 1.000 | 0.616 | 0.142 | 0.007 | 0.010 |
| 7.389 Hz | 0.018 | 0.616 | 1.000 | 0.004 | 0.006 | 0.004 |
| 8.854 Hz | 0.960 | 0.142 | 0.004 | 1.000 | 0.018 | 0.006 |
| 18.75 Hz | 0.007 | 0.007 | 0.006 | 0.018 | 1.000 | 0.149 |
| 21.13 Hz | 0.011 | 0.010 | 0.004 | 0.006 | 0.149 | 1.000 |

2.3.2. Calibración del modelo de EF campaña AVT 2

Teniendo un registro global de la estructura es posible dirigir un ajuste del modelo más acorde a las formas modales identificadas, que en este caso corresponden a los modos en sentido longitudinal (3.32 - 3.613 Hz), transversal (7.357 - 7.585 Hz) y rotacional en Y (18.652 - 18.848 Hz). Como en la calibración preliminar del modelo de EF de la campaña 1 inició modificando condiciones de borde del modelo para ajustar las formas modales numéricas a las experimentales; partiendo de las hipótesis iniciales de apoyo (Figura 5) planteadas junto con el modelo de EF de la campaña 1. La Figura 14

presenta el espectro de potencia en frecuencia de la campaña AVT 2.

Las formas modales en dirección transversal y longitudinal mostraban gran ajuste para las condiciones de apoyo contempladas (Figura 9) en dicha sección, pero el modo rotacional distaba considerablemente del valor experimental. Esto pudo resolverse incorporando al modelo resortes que simulaban la restricción de la placa adyacente y a medida que se ajustaba la rigidez del resorte simbólico en esta sección de la placa, el índice de la forma modal rotacional aumentaba considerablemente. En consecuencia, ajustar las condiciones de apoyo a las formas modales objetivo modificaba las frecuencias del

modelo, para subsanar esta alteración sin cambiar la rigidez de la estructura se optó por modificar la masa de esta ya que considerar modificar el módulo de elasticidad alteraba la rigidez del modelo; es importante anotar que la calibración de un modelo numérico podría tener infinitas respuestas por lo que acotar a un número finito de actualizaciones o cambios acortaría el tiempo computacional. En este caso, se ajustó la masa de la estructura. El hecho de no contar con planos estructurales detallados representa una limitación importante ya que suma incógnitas al problema de calibración e induce a que los ajustes realizados al modelo de EF no puedan ser verificadas en campo por la imposibilidad de realizar intervenciones invasivas en la estructura. Finalmente, cualquier modificación en la distribución de la masa de la placa impacta de forma considerable las mediciones de respuesta dinámica, como el uso de materiales aligerantes dentro de la placa que puede ser un factor relevante.

La variación de los parámetros de control (índice MAC, porcentaje de error relativo de frecuencia) para cada modificación del modelo de EF se muestran en la **Figura 15**. En promedio, para las 3 formas modales objetivo, el índice MAC (coherencia entre formas modales) es cercano a 0.95 y el porcentaje de error relativo ronda el 10%. Las condiciones de contorno que soportaron la calibración del modelo de EF (**Figura 16**) se presentan en la **Tabla 4** y las propiedades dinámicas del modelo calibrado en la **Tabla 5**.

Tabla 4. Rigidez de resortes agregados al modelo de EF

| | Rigidez 10 ³ [kN/m] | | | | |
|-----|--------------------------------|-----|----|-----|-----|
| | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 |
| SDx | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| SDy | 10 | 8.5 | 9 | 20 | 0 |
| SDz | 100 | 1 | 30 | 100 | 100 |
| SRx | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SRy | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SRz | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |

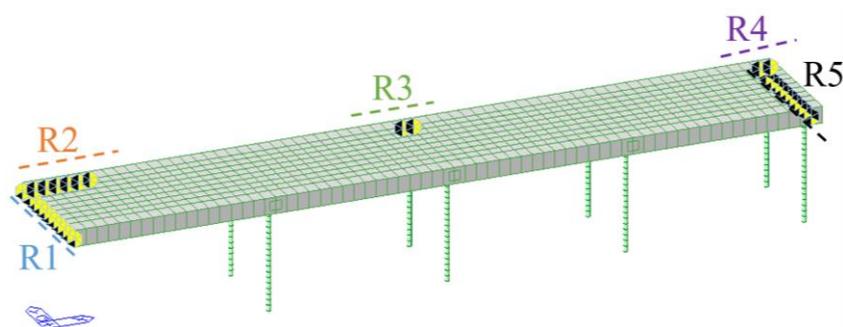


Figura 16. Condiciones de contorno para modelo actualizado a Campaña AVT 2. Fuente: elaboración propia.

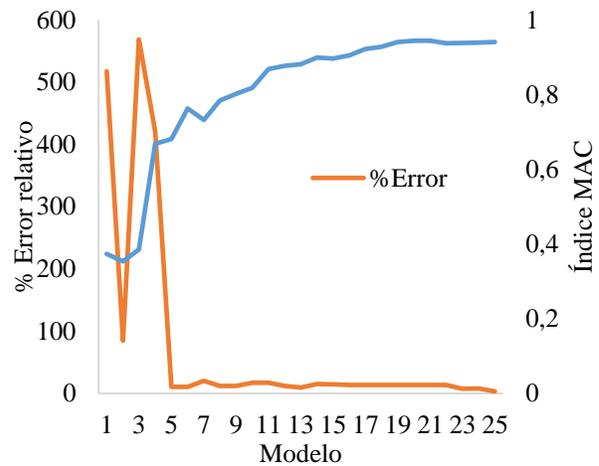


Figura 15. Variación de parámetros de control durante proceso de calibración. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Frecuencias naturales y porcentajes de participación de masa de modelo de FE ajustado

| | Frecuencia [Hz] | %Masa |
|----|-----------------|-------|
| X | 3.5658 | 99.86 |
| Y | 8.009 | 86.91 |
| Z | 20.4935 | 60.84 |
| RY | 27.8263 | 12.4 |

2.4. Óptima ubicación de sensores

Uno de los grandes retos en la caracterización dinámica radica en la consecución de óptimas ubicaciones de colocación de sensores a fin de reducir el costo de las campañas experimentales en lo relacionado con equipos y tiempo de medición. La ubicación óptima de sensores en pruebas de vibración depende de varios factores como la fuente de excitación, el objetivo global del sistema de monitoreo, es decir, que se pretende medir, y en el caso de vibraciones, las formas modales de interés [17].

En general los modos objetivo se seleccionan de estudios preliminares basados en modelos numéricos o pruebas de campo anteriores, proporcionando pruebas de campo que se pueden optimizar en función del número de sensores disponibles. Para el cálculo de las ubicaciones óptimamente seleccionadas se usó un algoritmo desarrollado por [18] que requiere como insumo la geometría de la estructura, valores numéricos de las formas modales de interés por nodo y la dirección del modo. El algoritmo desarrollado por [18] se fundamenta en el método EI que hace el cálculo para la cantidad de canales disponibles y modos objetivo. Las Figura 17 y Figura 18 muestran el conjunto de ubicaciones óptimas

para la colocación de equipos para las 3 formas modales objetivo que se obtienen del modelo de EF calibrado a partir de la campaña 2, las Figuras 19 y 20 muestran la ubicación según malla de instrumentación las ubicaciones a instalar sensores ubicando sensores a distancias de 6, 11 y 15 m, estas distancias son medidas desde el apoyo con el edificio adyacente. A partir de los modos experimentales obtenidos de campaña 2 se determinaron las coordenadas para la localización de sensores OSP (Optimum Sensor Placement) arrojando coordenadas en ambos extremos de la placa y concentrado ubicaciones en la zona de la placa sobrepuesta.

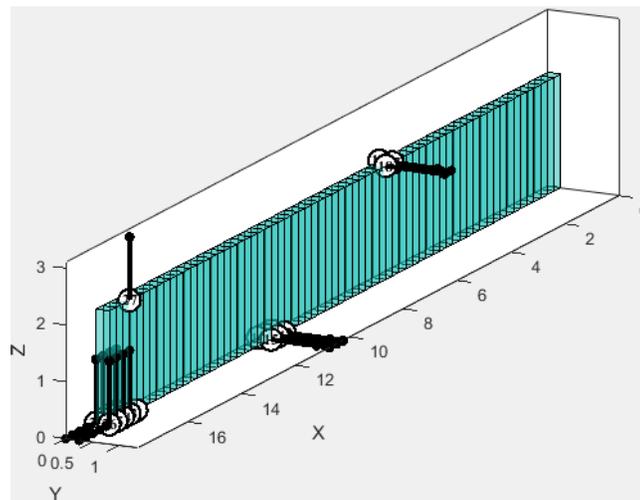


Figura 17. Vista isométrica OSP modos modelo de EF. Fuente: elaboración propia.

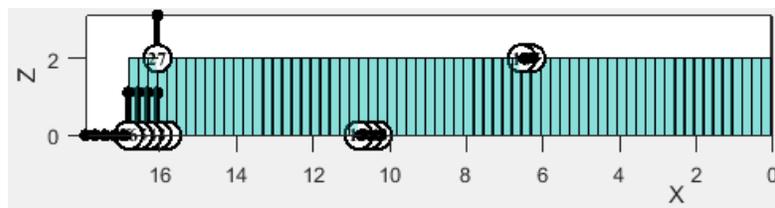


Figura 18. Vista planta OSP modos modelo de EF. Fuente: elaboración propia.

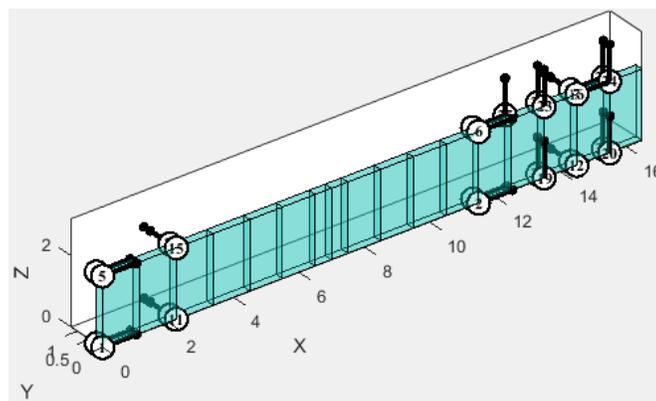


Figura 19. Vista isométrica OSP modos campaña 2. Fuente: elaboración propia.

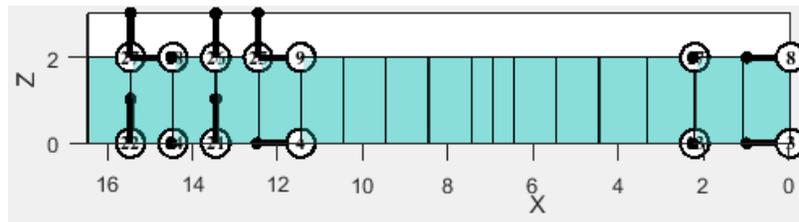


Figura 20. Vista planta OSP modos campaña 2. Fuente: elaboración propia.

Para analizar la efectividad de estas ubicaciones se comparó el espectro de frecuencias obtenido para las pruebas convencionales de la campaña 2 y del procesamiento de datos para dichas coordenadas se obtienen los resultados presentados en la **Figura 21**, donde es posible observar que hay una gran similitud en la distribución del contenido de frecuencias con algunas variaciones en la amplitud de los picos. Al comparar los parámetros modales identificados con las ubicaciones de OSP respecto a la malla convencional (campaña 2) y los obtenidos del modelo numérico calibrado con mediciones experimentales de la campaña 2, se observa gran consistencia respecto a los valores de referencia lo que muestra una ventaja tangible en la utilización del método EI como se muestra en la **Tabla 6**.

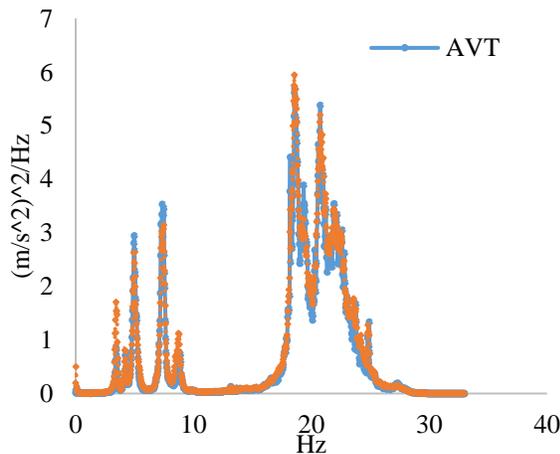


Figura 21. Espectros de frecuencia para convencionales y OSP. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Porcentaje de error para formas modales y frecuencias considerando OSP

| Modo | Campaña AVT 2 | | Modelo de EF OSP | |
|------|---------------|------------|------------------|------------|
| | MAC MODOS | Frecuencia | MAC MODOS | Frecuencia |
| 1-X | 0.0001% | 0.0000% | 0.0121% | 0.5017% |
| 1-Y | 0.0524% | 0.4255% | 0.3064% | 6.5040% |
| 1-RY | 3.6233% | 0.1766% | 7.7453% | 48.9232% |

2.5. Pruebas de vibración forzada

La fuente de excitación es un parámetro de especial interés para el diseño de este tipo de experimentos ya que depende de los recursos disponibles y las formas modales objetivo. Distintas fuentes de excitación se han documentado para excitar estructuras según lo documenta [19], [20], [21]. En puentes livianos tipo peatonales, algunos investigadores han usado cargas antrópicas como fuente de excitación [7], [22], [23] lo que sugiere contemplar esta fuente de excitación bajo la analogía que la placa bajo estudio puede “considerarse” como un puente peatonal. Un análisis del paso humano ha sido reportado por [24], [25] quienes estimaron fuerzas de impacto y longitud de zancada de 1600 N y 1,55 m respectivamente para patrones de carga con el humano corriendo, en los casos de carga caminando, la longitud de la zancada ronda los 0.7 m y fuerza de impacto de 1100 N. Por tal motivo, se plantearon 8 casos de carga que fueron simulados en MIDAS CIVIL© mediante un análisis Time-History en los que se hacía transitar a una persona a 2 velocidades (**Tabla 7**).

Tabla 7. Casos de carga para vibración forzada

| Caso de carga | Velocidad [km/h] | Repeticiones |
|---------------|------------------|--------------|
| 1 | 4 – caminar | 5 |
| 2 | 4 | 10 |
| 3 | 4 | 15 |
| 4 | 4 | 20 |
| 5 | 15 - correr | 5 |
| 6 | 15 | 10 |
| 7 | 15 | 15 |
| 8 | 15 | 20 |

Los registros de aceleraciones (**Figura 22**) obtenidos del análisis tiempo historia fueron procesados en configuraciones y ubicaciones de nodos idénticos a los mostrados en la **Figura 12** para guardar similitud con las campañas a escala real, lo que permitió obtener los espectros de frecuencia para los 8 casos de carga que visualmente muestran la misma distribución de picos de frecuencias (**Figura 23**). Es de anotar que la distribución de frecuencias para los casos de carga de correr se concentran en el rango de frecuencias objetivo (formas

modales de interés) aunque la coherencia de las formas modales para los primeros modos longitudinal y transversal es reducida, caso contrario sucede con los modos de mayor frecuencias (verticales y rotacionales) en los que el índice MAC aumenta considerablemente (Figura 24).

La coherencia de las formas modales identificadas para los casos de carga simulados es superior para aquellos en los que la persona corre sobre la placa y el número de repeticiones adecuadas esta en 10 y 15. En cuanto los porcentajes de error de las frecuencias naturales este es menor al correr sobre la placa y disminuye para las frecuencias de modos verticales y rotaciones (frecuencias altas).

3. Discusión de resultados

ciertos aspectos a destacar como los evidenciados en la campaña experimental AVT 1 en contraste con la campaña experimental AVT 2, donde caracterizar dinámicamente la totalidad de la placa mejora y reduce incertidumbres en la identificación de las propiedades dinámicas como se evidencia en los modelos de EF ajustados para cada campaña, los cuales distan

principalmente en las condiciones de borde y masa global de la estructura; no instrumentar toda la estructura durante las pruebas dinámicas podría conducir a falsas identificaciones modales y líneas base de la estructura erróneas.

Es importante resaltar que los efectos de contorno tienen una influencia muy marcada en la definición de las formas modales, por tal motivo se concluye que independientemente de los errores que se tengan en la definición de las condiciones de contorno que es mejor realizar una instrumentación de toda la placa para poder calibrar de forma más adecuada el modelo de EF. El método (EI) y algoritmo usado ([18]) para la estimación de ubicaciones óptimas de sensores sobre la placa resultó ser eficiente al lograr la identificación de formas modales de gran consistencia respecto las pruebas experimentales de malla densa de ubicaciones y valores numéricos del modelo de EF; aunque la precisión de los datos identificados está supeditado a los canales disponibles de instrumentación se logra una reducción significativa de hasta 50% en la duración de las campañas experimentales.

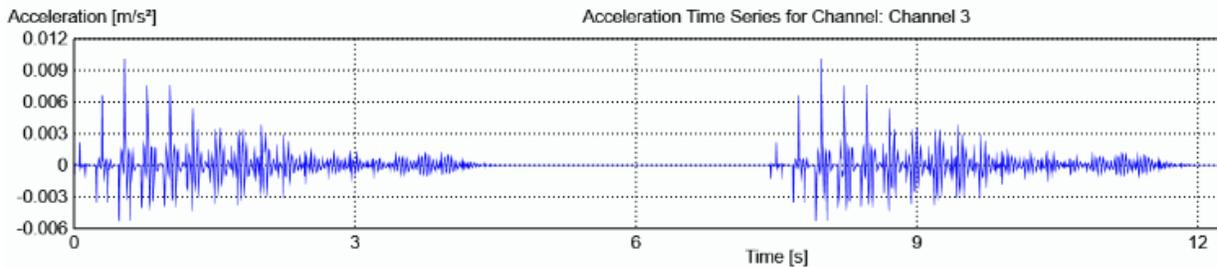


Figura 22. Registro de aceleraciones verticales. Fuente: elaboración propia.

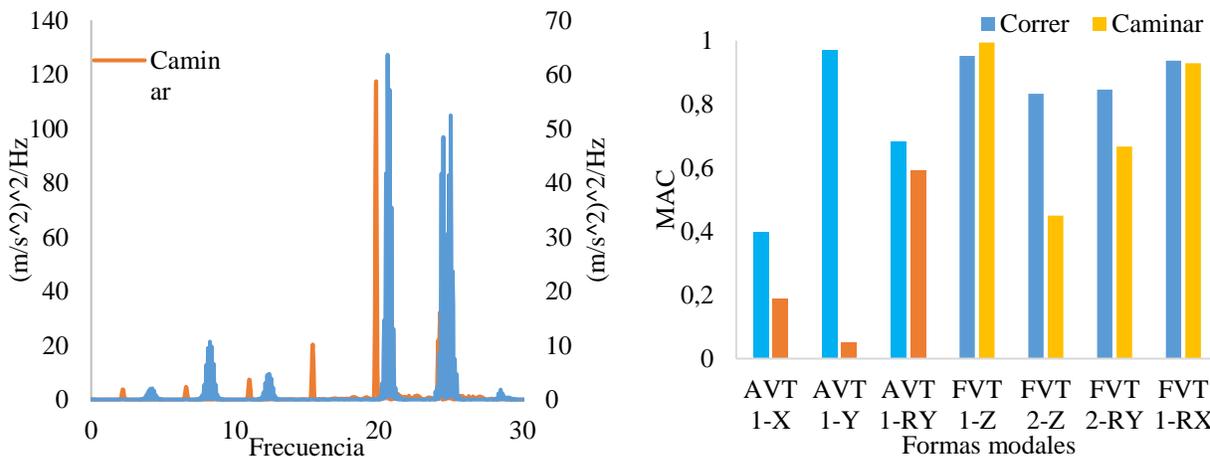


Figura 23. Espectro de frecuencias para casos de carga al correr y caminar. Fuente: elaboración propia.

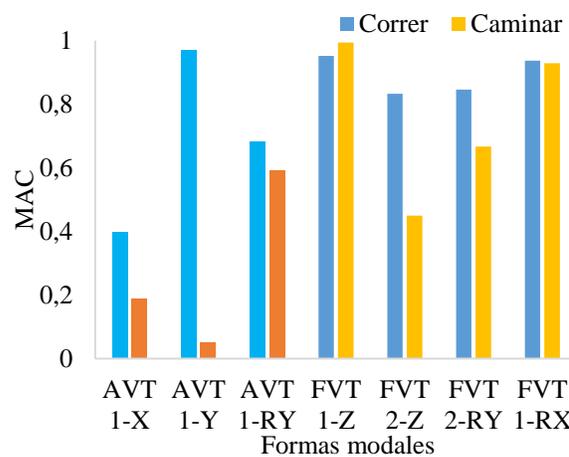


Figura 24. Índice MAC por forma modal de interés. Fuente: elaboración propia.

Este aspecto debe ser analizado con mucha prudencia en tipologías de estructuras como la presentada en este artículo, donde una implementación de OSP partiendo de un modelo número no calibrado puede llevar a resultados erróneos por la diferencia significativa que va a existir entre las formas modales obtenidas del modelo de EF y las que son medibles en la estructura. En cuanto el diseño de experimento para las pruebas de vibración forzada contemplar múltiples situaciones y/o casos de carga permite discernir entre aquellos que ofrecen mejores resultados.

Las propiedades dinámicas identificadas en las pruebas de vibración ambiental predominan en las direcciones longitudinal y transversal de la placa dejando una clara ausencia de formas modales verticales y de acuerdo con los datos presentados en las [Figura 23](#) -[Figura 24](#) - [Figura 25](#) - [Figura 26](#) el patrón de carga propuesto (Correr a 15km/h durante 10 – 15 repeticiones para cada configuración de equipos) excita estos modos ausentes; aunque esto queda por fuera del alcance de la presente investigación.

4. Conclusiones

Este artículo presenta una metodología de caracterización estructural para zonas de acceso con cubierta pesada en edificaciones educativas donde es posible encontrar un marcado efecto de la respuesta dinámica debido principalmente a las condiciones de contorno que presentan este tipo de estructuras, este aspecto aumenta la complejidad del modelado estructural por la dificultad que se tiene para validar condiciones de apoyo con inspecciones visuales. En la investigación se parte de un modelo numérico elaborado con mediciones en campo, que posteriormente es calibrado con

mediciones de vibración ambiental y un ajuste del modelo numérico gracias al adecuado modelado de las condiciones de contorno mediante la utilización de resortes en ubicaciones seleccionadas a partir de inspección visual de posibles lugares que estarían restringiendo el movimiento; el modelo calibrado presentó diferencias de menos del 5% de error en las frecuencias naturales de los modos con mayor porcentaje de participación de masas (longitudinal y transversal) y un error del 10% en el modo rotacional (bajo porcentaje de participación de masa). Las ubicaciones óptimas calculadas con el algoritmo EI resultaron ser efectivas con altas consistencias modales entre las formas modales de referencia, lo mismo sucede con las frecuencias identificadas con dichas ubicaciones, se recomienda realizar una medición con malla densa de sensores en este tipo de estructuras y a partir de estas ubicaciones e información obtenida calcular las óptimas ubicaciones teniendo presente los canales de instrumentación disponibles.

Finalmente, considerar fuerzas de excitación adicionales a las ambientales complementa, en términos numéricos, la identificación de propiedades dinámicas con alto porcentaje de participación de masa aunque esto depende de factores como el tiempo de fuente, magnitud y frecuencia de excitación; dado que los modos ausentes en la identificación dinámica son los verticales, por lo que es coherente asumir que la dirección de interés para aplicar la fuerza debe ser la vertical según los resultados de la presente investigación.

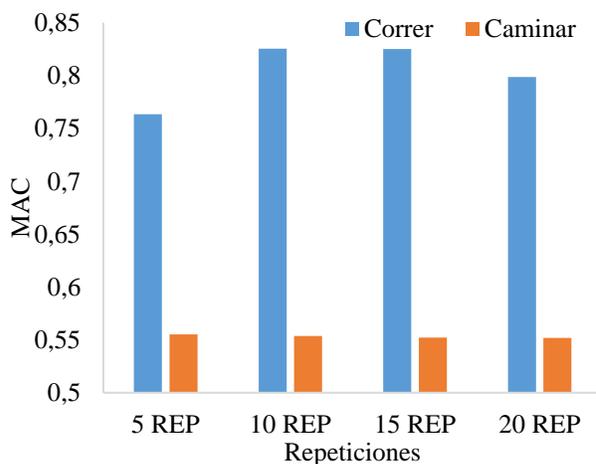


Figura 25. Índice MAC por repeticiones y casos de carga
Fuente: elaboración propia.

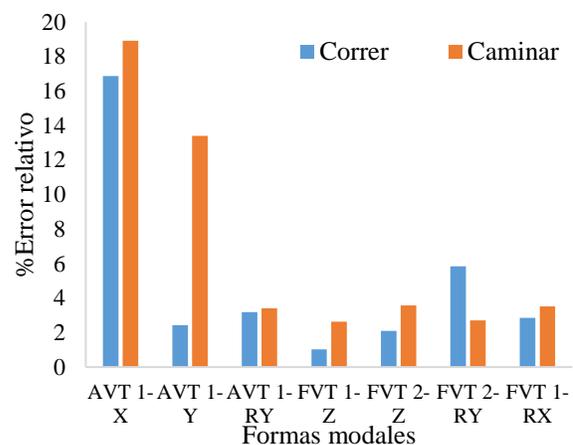


Figura 26. Porcentaje error relativo de frecuencias
Fuente: elaboración propia.

Es importante también considerar que la calibración del modelo de EF debe estar centrada en las formas modales con mayor participación de masa y que las condiciones de rigidez alteran predominantemente la forma modal y las variaciones en masa afectan principalmente las frecuencias naturales, aunque es una afirmación general para la tipología de estructura presentada en este artículo, se fundamenta en una realidad y es que para este tipo de estructuras no se tiene información estructural de referencia como ser planos estructurales, memorias de cálculo, módulo de elasticidad del material o bitácoras de obra.

Para las pruebas de vibración forzada contempladas en este documento con cargas antrópicas se sugiere contar con una cantidad de personas corriendo sobre la placa igual a la cantidad de repeticiones para no sobre esforzar al personal que participa en la prueba. Para futuras investigaciones se recomienda plantear distintos casos de carga para ejecutar las pruebas de vibración forzada con dispositivos mecánicos como excitadores o similares.

Agradecimientos

Los investigadores agradecen el apoyo recibido de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander y el grupo de investigación INME.

Financiación

La investigación fue financiada bajo el proyecto 2700 de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander y el contrato de financiamiento de recuperación contingente No. 2022-0647 de Minciencias.

Contribución de los autores

C. Moreno: Curación de datos, Análisis formal, Redacción – borrador original, Investigación. W. Hernández: Curación de datos, Análisis formal, Investigación. G. Chio-Cho: Investigación, Metodología, Supervisión. Á. Viviescas: Conceptualización, Metodología, Administración del proyecto. C. A. Riveros-Jerez: Validación, Redacción – revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, “Titulo A - Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente,” *Reglam. Colomb. Construcción Sismo Resist.* NSR-10, vol. Titulo A, pp. 1–174, 2010.
- [2] Uroš, M.; Demšić, M.; Baniček, M.; Pilipović, “A. Seismic Retrofitting of Dual Structural Systems—A Case Study of an Educational Building in Croatia,” *Buildings*, vol. 13, p. 292, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13020292>
- [3] S. Kashif Ur Rehman, Z. Ibrahim, S. A. Memon, M. Jameel, “Nondestructive test methods for concrete bridges: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 107, pp. 58–86, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>
- [4] J. M. W. Brownjohn, F. Magalhaes, E. Caetano, A. Cunha, “Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge,” *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 8, pp. 2003–2018, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.02.034>
- [5] F. Magalhães, E. Caetano, Á. Cunha, O. Flamand, G. Grillaud, “Ambient and free vibration tests of the Millau Viaduct: Evaluation of alternative processing strategies,” *Eng. Struct.*, vol. 45, pp. 372–384, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.038>
- [6] E. Muñoz, F. Núñez, J. A. Rodríguez, A. Ramos, C. Otálora, “Seismic vulnerability and loading capacity of a wire strained bridge based on structural reliability,” *Rev. Ing. Constr.*, vol. 25, no. 2, pp. 285–323, 2010, doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-50732010000200006>
- [7] J. Malveiro, D. Ribeiro, C. Sousa, R. Calçada, “Model updating of a dynamic model of a composite steel-concrete railway viaduct based on experimental tests,” *Eng. Struct.*, vol. 164, no. October 2017, pp. 40–52, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.057>

- [8] F. Benedettini, M. Dilena, A. Morassi, “Vibration analysis and structural identification of a curved multi-span viaduct,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 54, pp. 84–107, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.08.008>
- [9] J. M. W. Brownjohn, “Structural health monitoring of civil infrastructure,” *Philos. Trans. R. Soc.*, no. May 2009, pp. 589–622, 2007, doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1925>
- [10] P. Pachón, R. Castro, E. García-Macías, V. Compan, E. Puertas, “E. Torroja’s bridge: Tailored experimental setup for SHM of a historical bridge with a reduced number of sensors,” *Eng. Struct.*, vol. 162, no. September 2017, pp. 11–21, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.035>
- [11] M. Domaneschi, A. Zamani Noori, M. V. Pietropinto, G. P. Cimellaro, “Seismic vulnerability assessment of existing school buildings,” *Comput. Struct.*, vol. 248, p. 106522, 2021, doi: 1 <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106522>
- [12] S. Kacin, H. C. Yilmaz, C. V. Caglar, “Determination to the period of a school building before and after its retrofitting using ambient vibration records,” *Turkish J. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 156–160, 2022, doi: <https://doi.org/10.31127/tuje.873050>
- [13] F. Gara, S. Carbonari, D. Roia, A. Balducci, L. Dezi, “Seismic Retrofit Assessment of a School Building through Operational Modal Analysis and f.e. Modeling,” *J. Struct. Eng.*, vol. 147, no. 1, pp. 1–12, 2021, doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002865](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002865)
- [14] D. C. Kammer, “Sensor Placement for On Orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures,” *J. Guid. Control. Dyn.*, vol. 14, no. 2, pp. 251–259, 1991, doi: <https://doi.org/10.2514/3.20635>
- [15] P. Omenzetter et al., “Forced and ambient vibration Testing of Full Scale Bridges,” *Aberdeen*, 2013. doi: <https://doi.org/10.13140/2.1.1168.5448>
- [16] J. D. Cryer, J. S. Bendat, and A. G. Piersol, *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*, 4th ed., vol. 82, no. 400. New Jersey: Wiley, 2010.
- [17] C. Riveros, E. García, J. Rivero Jerez, “A comparative study of sensor placement techniques for structural damage detection,” *Rev. EIA*, no. 20, pp. 23–37, 2013, doi: <https://doi.org/10.14508/reia.2013.10.20.23-37>
- [18] C. Farrar, M. Todd, E. Flynn, D. Harvey, “SHMTools Software.” Los Alamos National Laboratory, New Mexico, p. 199, 2010, [Online]. Available: <https://www.lanl.gov/projects/national-security-education-center/engineering/software/shm-data-sets-and-software.php>.
- [19] M. F. Green, “Modal test methods for bridges: A review,” *Conf. 1995 IMAC XIII – 13th Int. Modal Anal. Conf.*, pp. 552–558, 1995.
- [20] F. J. Carrion viramontes, A. Lozano Guzman, M. de J. Fabela Gallegos, D. Vazque Vega, A. Romero Navarrete, “Evaluación de Puentes Mediante el Análisis de Vibraciones,” *Instituto mexicano del transporte, Publicación técnica*, no.139. 1999.
- [21] R. Cantieni, “Experimental methods used in system identification of civil engineering structures,” *Proc. 1st Int. Oper. Modal Anal. Conf. IOMAC 2005*, pp. 10–11, 2005.
- [22] J. Brownjohn, M. Bocian, D. Hester, “Forced vibration testing of footbridges using calibrated human shaker and wireless sensors,” *Procedia Eng.*, vol. 199, pp. 417–422, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.134>
- [23] S. Ivorra, D. Foti, D. Bru, and F. J. Baeza, “Dynamic behavior of a pedestrian bridge in Alicante, Spain,” *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 29, no. 5, pp. 1–10, 2015, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000556](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000556)
- [24] A. Gonzalez de la Rubia, “La zancada paso a paso,” *Corricolari*, vol. 16, no. 1, pp. 44–47, 2013.
- [25] R. Pamies Vila, J. M. Font Llagunes, J. Kövecses, “Análisis dinámico del impacto pie-suelo en el correr,” *Congr. Nac. Ing. Mecánica*, pp. 1–8, 2014.