



ID: XXXVIIIJSIE-07-001

EVALUACIÓN DINÁMICA ESTRUCTURAL DE ESTRUCTURAS EDUCATIVAS COMPLEMENTARIAS USANDO PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

DYNAMIC ASSESSMENT OF COMPLEMENTARY EDUCATIONAL STRUCTURES USING AMBIENT VIBRATION TEST

Wilson Hernandez (1) (P); Carlos Alberto Riveros-Jerez (2); Alvaro Viviescas Jaimes (3)

(1) MSc, Universidad de Investigación y Desarrollo, Facultad de Ingeniería, Bucaramanga, Colombia.

(2) Dr. Eng, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Medellín, Colombia

(3) Ph.D, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil, Bucaramanga, Colombia

Dirección para correspondencia: whernandez9@udi.edu.co (P) Presentador

Área Temática: Instrumentación, monitoreo y control de estructuras

Resumen

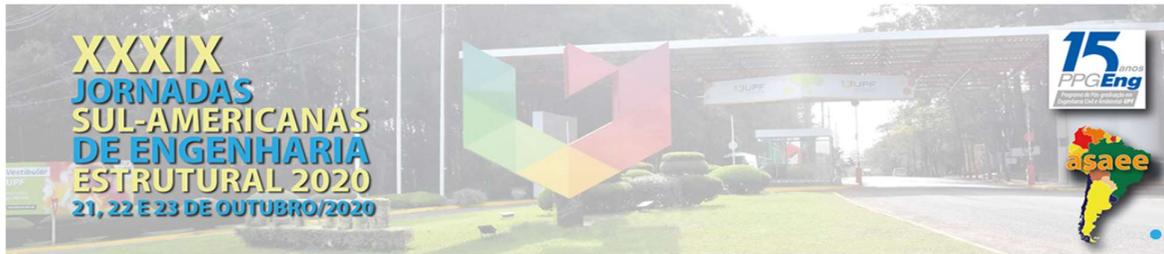
Los campus universitarios consisten principalmente en edificios educativos separados para cumplir con los requisitos urbanos y proporcionar espacios abiertos a los estudiantes. Sin embargo, las estructuras educativas complementarias, como corredores y plataformas, se utilizan ampliamente para conectar edificios educativos. En Colombia, es posible encontrar varias configuraciones estructurales para este tipo de estructuras, pero debido a su función secundaria, esas estructuras complementarias se construyeron sin seguir las normas del código y, en algunos casos, se apoyan en edificios educativos. La situación se vuelve crítica porque la combinación de diferentes materiales estructurales genera dificultades en el modelado de dichas estructuras. Por otra parte, no se dispone de información relacionada con las especificaciones de construcción. Las inspecciones visuales son difíciles de realizar cuando se analiza el tipo de conexión porque los elementos no estructurales no permiten una inspección completa de la conexión entre el edificio educativo y la estructura complementaria. Este artículo presenta el diagnóstico dinámico de una estructura educativa complementaria ubicada en la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Esta estructura está ubicada en la entrada de un edificio educativo de tres pisos y consiste en una losa de concreto que funciona como techo apoyado sobre columnas.

Palabras-clave: pruebas de vibración ambiental, modelamiento numérico, condiciones de borde

Abstract

The university campuses mainly consist of separate educational buildings to meet urban requirements and provide open spaces to students. However, complementary educational structures such as corridors and platforms are widely used to connect educational buildings. In Colombia, it is possible to find several structural configurations for such structures, but due to their secondary function, those complementary structures were constructed without following code regulations and, in some cases, are supported in educational buildings. The situation becomes critical because the combination of different structural materials leads to difficulties in modelling such structures. On the other hand, no information related to construction specifications is available. Visual inspections are challenging to conduct when analyzing the type of connection because non-structural elements do not allow complete inspection of the connection between the educational building and the complementary structure. This paper presents the dynamic assessment of a complementary educational structure located in the Industrial University of Santander, Bucaramanga, Colombia. This structure is located at the entrance of a three-floor educational building and consists of a concrete slab that functions as a roof supported on columns.

Keywords: ambient vibration test, numerical modelling, boundary conditions



1. INTRODUCCIÓN

Las edificaciones para el funcionamiento de instituciones educativas como centros de congregación de personas han tenido especial atención y cuidado durante las etapas de diseño y mantenimiento estructural según la normativa colombiana que las clasifica como edificaciones de atención a la comunidad siendo “*estructuras indispensables después de un temblor para atender la emergencia y preservar la salud y la seguridad de las personas*” (AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010b) y ante la ocurrencia de eventos extremos que afecten la integridad de la edificación es fundamental implementar estrategias de rehabilitación estructural en función de la afectación estructural causada por el evento. Estructuras complementarias como plataformas o corredores de conexión entre edificios no son considerados por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 como parte del sistema de resistencia sísmica por lo que no son diseñadas con la misma rigurosidad que los edificios principales de instituciones educativas lo que aumenta la probabilidad de ocurrencia de daño severo o grave.

(Alcocer et al., 2020) desarrolló un estudio integral de recopilación y análisis de datos sobre el desempeño sísmico de edificios escolares después de los terremotos de 2017 instrumentando 14 edificaciones para evaluar el desempeño estructural mediante modelado numérico identificando que estructuras relativamente antiguas (anteriores a 1985) tienen más probabilidad de daño. (Alcocer et al., 2020) indicaron que es probable que edificios rehabilitados con revestimiento de mampostería y adición de nuevos muros de corte cumplan con el nivel de desempeño de ocupación inmediata. Una situación similar podría presentarse con las edificaciones educativas en Colombia y considerando que las estructuras complementarias no hacen parte del sistema de resistencia sísmica son más propensas a afectaciones mayores ante eventos extremos. Ante esta situación, este artículo presenta un estudio numérico experimental encaminado a identificar la respuesta dinámica de una estructura complementaria de edificio educativo tipo cubierta como antecedente para el monitoreo estructural continuo de la edificación.

2. METODOLOGÍA

2.1. Caso de estudio

La cubierta o techo que recubre el acceso al edificio de la escuela de ingeniería mecánica y el auditorio de mecánica es una placa en concreto de 18 cm de espesor soportado en columnas de concreto de 200 x 200 mm, tiene una longitud total de 22.5 m distribuida en 6 vanos de 2+5+4.5+4+4.5+2.5 m con altura de columnas de 3 m y ancho de losa de 3.2 m, en la zona de entrada al edificio está apoyada en los muros de mampostería divisorios, en la zona de acceso al auditorio está soportada un par de columnas de concreto adicionales. En la Figura 1 se muestra la distribución de vanos y el detalle de conexión con las estructuras anexas.

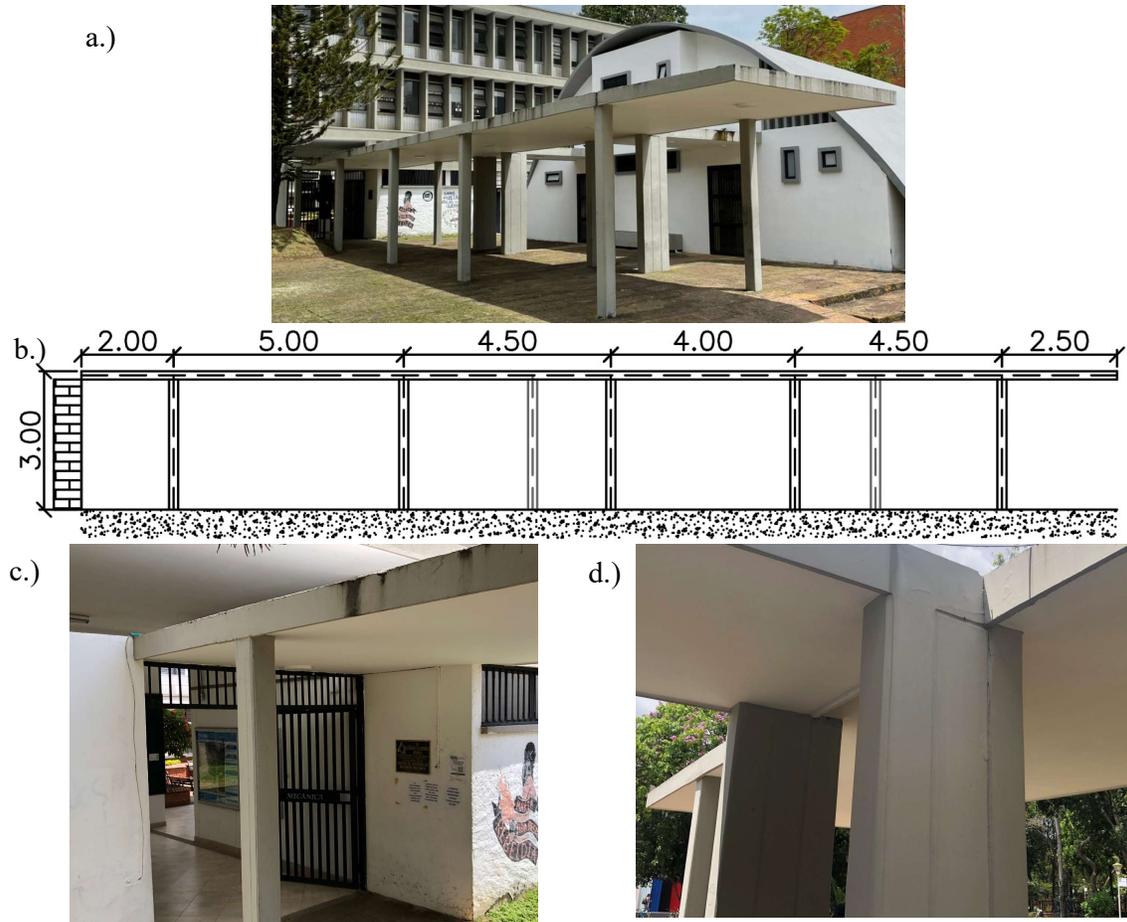


Figura 1 a) vista isométrica costado noroccidental, b) distribución de vanos c) detalle de conexión con edificio d) detalle de conexión con placa acceso al auditorio

2.2. Modelo de elementos finitos

El edificio de la escuela de Ingeniería Mecánica y el Auditorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander fueron construidos en 1953 y 1959 respectivamente (Gobernación de Santander, 2018; Universidad Industrial de Santander, 2018) y ante la latencia de tiempo no fue posible identificar dentro de los documentos públicos de construcción de dichos edificios y estructuras anexas los planos constructivos de la placa de interés por lo que se optó por realizar un levantamiento geométrico para establecer dimensiones de los elementos y mediante inspecciones visuales determinar las condiciones de frontera en las zonas de conexión con las estructuras adyacentes. Se asumió que la tipología estructural corresponde a un pórtico resistente a momentos con losa aligerada como se muestra en la Figura 2 con vigas internas de sección transversal de 150 x 180 mm, viguetas de 70 mm de espesor, losa superior de 50 mm de altura y losa inferior de 20 mm de altura. Con dichas dimensiones de partida se construyó un modelo de elementos finitos (FEM) preliminar en el software MIDAS GEN© usando elementos tipo BEAM, módulo de elasticidad 21538 MPa, resistencia del concreto $f'c=21$ MPa. En la Figura 3 se muestra



la placa aporcada de losa aligerada presentando un detalle esquemático del sistema estructural. Al analizar las condiciones de apoyo con las estructuras adyacentes (Figura 1c -1d) se plantearon 3 hipótesis de apoyo en la conexión con la entrada al edificio siendo las siguientes: apoyo articulado, uniones empotradas y conexión tipo resorte para 3 valores de K: 1000 kN/m, 10000 kN/m, 100000 kN/m. En la Figura 4 se presenta esquemáticamente la distribución de condiciones de borde en cada situación.

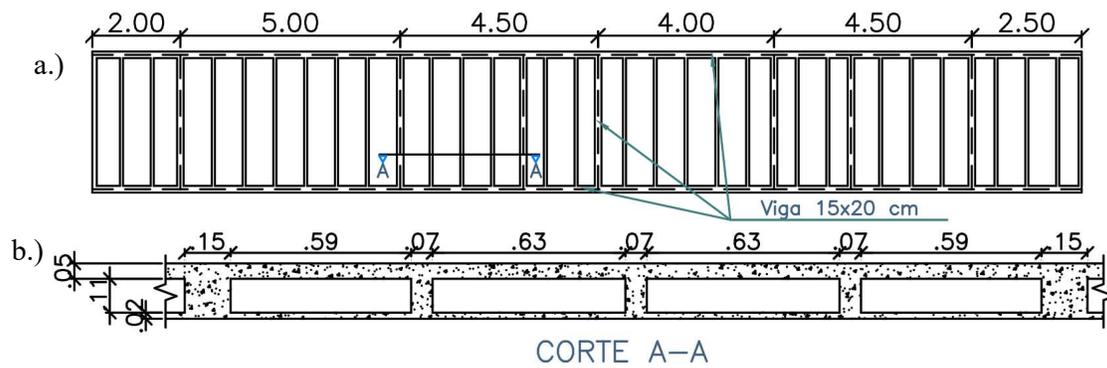


Figura 2 a) Vista en planta de losa aligerada b.) vista transversal corte A-A

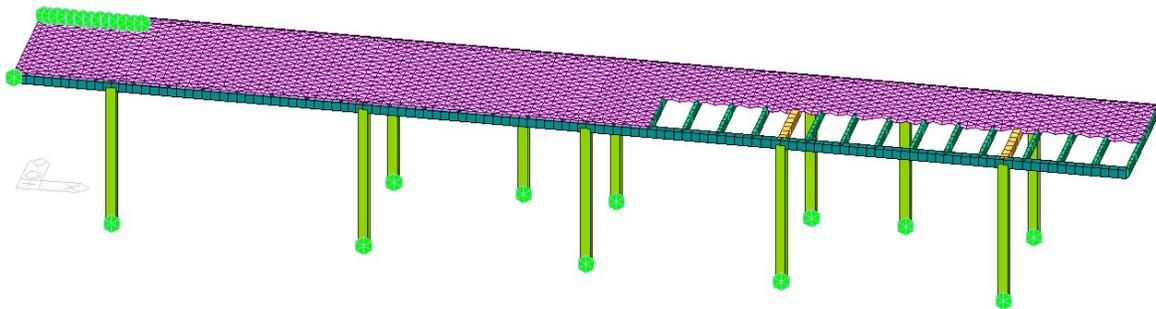
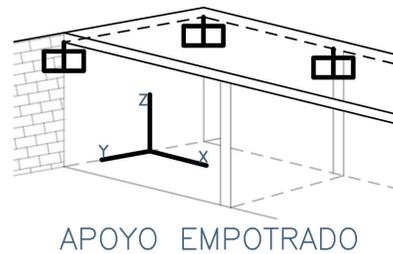
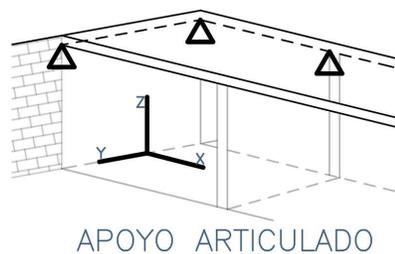


Figura 3 Vista isométrica con detalle de losa aligerada y viguetas MIDAS GEN



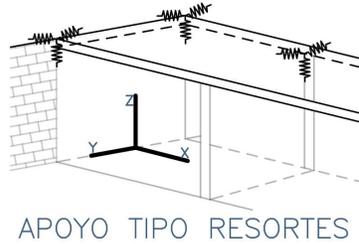


Figura 4 vista isométrica de esquema de condiciones de borde

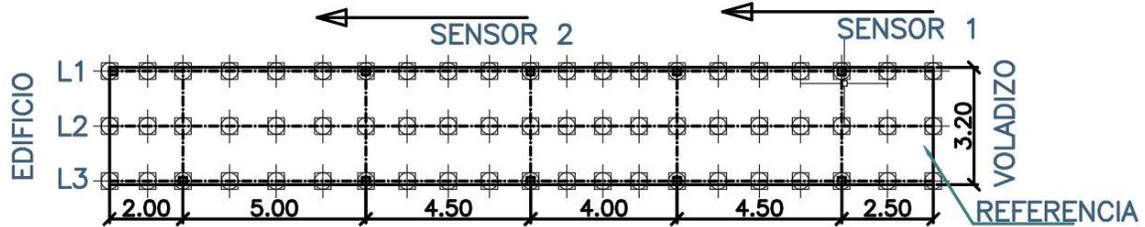


Figura 5 Ubicación esquemática de acelerómetros en placa



Figura 6 Instalación de acelerómetros sobre película impermeabilizante

2.3. Pruebas de vibración experimental

Se usaron tres acelerómetros triaxiales de referencia Obsidian© de fuerza balanceada de rango dinámico de 150 dB con ancho de banda hasta 200 Hz, rango de escala completa entre ± 2 y ± 4 g. Los sensores se ubicaron tres líneas de instrumentación en la sección transversal y cada $L/2$ y $L/4$ en la dirección longitudinal de la placa como se muestra en la Figura 5 donde un sensor de referencia se instaló en el voladizo y dos sensores móviles se desplazaban a lo largo de las líneas de instrumentación para obtener el barrido total de la placa que estuvo sometida a vibraciones ambientales sin cargas antrópicas. Cuando se realizó la instrumentación de la placa, esta estaba recubierta por una película de impermeabilizante de espesor espumoso y fue imposible retirarla sin afectar la integridad de la película que estaba adherida a la losa en concreto (Figura 6), por tal razón, los acelerómetros se instalaron sobre la película de impermeabilizante.



2.4. Procesamiento de señales de vibración ambiental

Los registros de aceleraciones de vibración ambiental almacenados en los tres acelerómetros fueron procesados en el software ARTeMIS © mediante la técnica Frequency Domain Decomposition - FDD (Chen et al., 2017; Testa et al., 2021) que realiza la descomposición aproximada de la respuesta del sistema en un conjunto de sistemas independientes de un grado de libertad para cada modo, la operación se realiza descomponiendo cada una de las matrices de densidad espectral estimadas. Como procedimiento general, se generó una matriz de nueve canales con los tres acelerómetros para cada dirección ortogonal por ubicación de registro, luego se asignó a cada nodo con coordenadas fijas y se asignó frecuencias de muestro a 200 Hz. Para el rango de frecuencias de 0 a 20 Hz con ventana de 1024 datos y superposición de ventanas de 66% se obtuvo el espectro de potencia en frecuencia mostrado en la

Figura 7a anexando las 3 formas modales identificadas en la Figura 7 b, c, d.

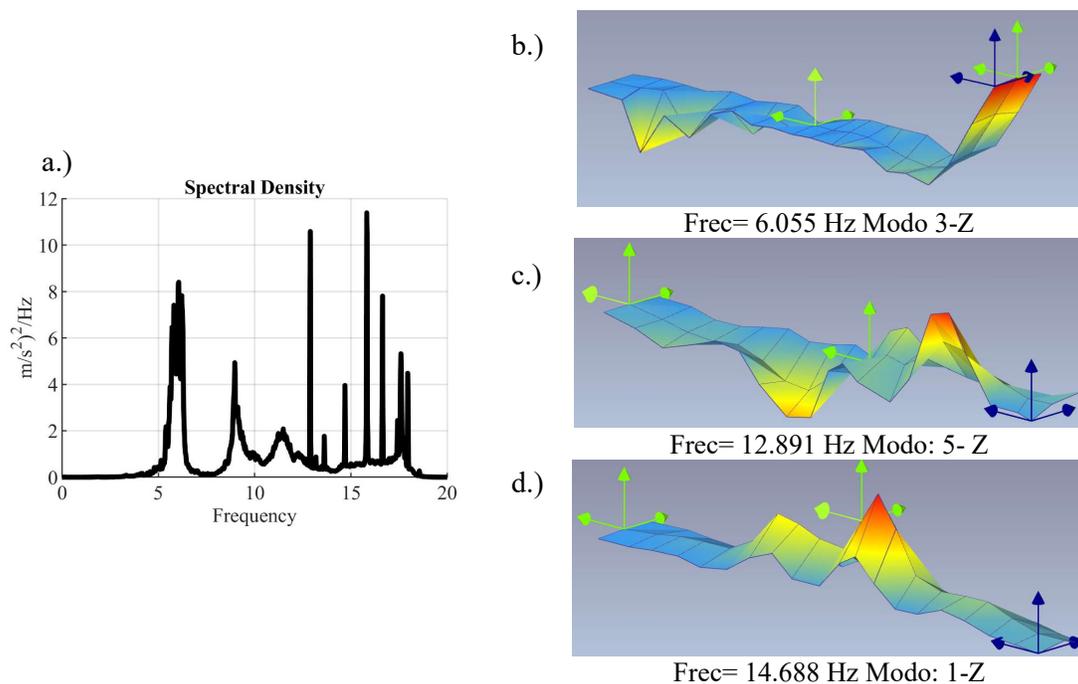
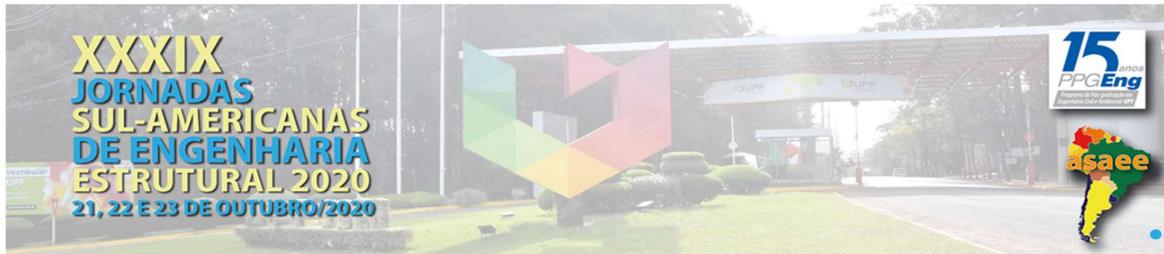


Figura 7 a) espectro de potencia en frecuencia, Formas modales b) 3-Z, c) 5-Z, d) 1-Z

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Comparación de parámetros modales experimentales (AVT) Vs numéricos (FEM)

La comparación de parámetros modales se realizó determinando la consistencia entre las formas modales experimentales y numéricas usando el índice MAC como un parámetro adimensional para correlacionar la semejanza o diferencia entre dos vectores (forma modal) de interés donde los valores cercanos a 1 indican alta correlación y valores cercanos a 0 indican independencia modal, como nivel de aceptación se define que valores superiores al 80% (0.8) son



aceptables como buena correlación modal (Pastor et al., 2012). En primera instancia, se analizó la incidencia de las condiciones de borde en el ajuste modal de los modos identificados encontrando que simular la conexión empotrada con la estructura adyacente se acerca más el comportamiento real con ajuste en promedio de 54% (Tabla 1); comparando los valores de frecuencia se identificaron variaciones de hasta 19.3% (Tabla 2) en promedio para los tres modos, se identificó que los valores experimentales son menores que los numéricos obtenidos de FEM y considerando que la placa no tiene masa significativa adicionada el parámetro a modificar para el ajuste de valores de frecuencia fue el módulo de elasticidad reduciendo hasta 65% el módulo de elasticidad inicial de 21538.1 MPa para $f'c$ de 21 MPa (Tabla 3).

Tabla 1 Ajuste modal para condición de borde

| Modo | Tipo de condición de borde | | | | |
|----------|----------------------------|-----------|-----------|------------|-------------|
| | Articulado | Empotrado | Resorte | | |
| | | | 1000 kN/m | 10000 kN/m | 100000 kN/m |
| Modo 3-Z | 0.806 | 0.806 | 0.806 | 0.806 | 0.806 |
| Modo 5-Z | 0.278 | 0.337 | 0.222 | 0.217 | 0.274 |
| Modo 1-Z | 0.344 | 0.477 | 0.394 | 0.105 | 0.353 |
| Promedio | 0.476 | 0.540 | 0.474 | 0.376 | 0.478 |

Tabla 2 Ajuste de frecuencias para $E= 21538.1$ MPa $f'c= 21$ MPa

| Modo | Frecuencia [Hz] | | % Error ABS | Promedio |
|----------|-----------------|-------|-------------|----------|
| | AVT | FEM | | |
| Modo 3-Z | 6.02 | 6.69 | 11.22 | 19.30 |
| Modo 5-Z | 12.73 | 16.29 | 27.89 | |
| Modo 1-Z | 14.57 | 17.31 | 18.79 | |

Tabla 3 Variación de frecuencias naturales para ajuste de módulo de elasticidad

| Modo | AVT | Frecuencia para %de E inicial | | | | | | |
|-------------|-------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 65% | 70% | 75% | 80% | 85% | 90% | 95% |
| Modo 3-Z | 6.02 | 5.39 | 5.57 | 5.76 | 5.95 | 6.14 | 6.31 | 6.49 |
| Modo 5-Z | 12.73 | 13.13 | 13.56 | 14.03 | 14.49 | 14.94 | 15.37 | 15.79 |
| Modo 1-Z | 14.57 | 13.96 | 14.41 | 14.92 | 15.40 | 15.88 | 16.34 | 16.79 |
| % Error Abs | | 5.89 | 5.00 | 5.58 | 6.86 | 9.44 | 12.61 | 15.70 |

Es de notar que el mejor ajuste en cuanto formas modales y valores de frecuencia natural se tienen para la condición de borde tipo empotramiento y módulo de elasticidad cercano a 15077 MPa que presenta una resistencia de concreto ($f'c$) alrededor 10.3 MPa que es un valor de resistencia a compresión muy reducido; se puede atribuir esta afectación estructural a dos parámetros determinantes como lo es la ausencia de planos verídicos constructivos y la película de impermeabilizante acolchado sobre la losa superior que generó distorsión en la transmisión de onda de un medio a otro.



4. CONCLUSIONES

La ausencia de planos constructivos representó un reto importante al modelamiento numérico de la placa tipo cubierta en cuestión de definir el sistema estructural probablemente empleado en la construcción junto con la conexión de los elementos con el edificio adyacente; según los resultados numéricos reportados el tipo de conexión entre la placa y el edificio se puede simular tipo empotramiento perfecto como se plantea en la Figura 4 según la inspección visual mostrada en la Figura 1C. La película de impermeabilizante como elemento intermedio entre la losa de concreto y el acelerómetro podría justificar la reducción severa de resistencia del concreto teniendo en cuenta que se redujo hasta un 50% del valor estimado inicial (10 MPa) situación que difiere ampliamente de lo permitido en el numeral C.1.1.1 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 en Título C (AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010a) que establece resistencia mínima para concreto de 17.5 MPa. Ante las limitaciones prácticas de retirar y reinstalar la capa de impermeabilizante para futuras mediciones sería prudente emplear acelerómetros que puedan ser instalados en la parte inferior de la losa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de MINCIENCIAS del proyecto: “monitoreo del comportamiento a largo plazo de la respuesta estructural de puentes viga cajón segmentales” (Proyecto No. 82321).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010a). NSR10 - Título C: Concreto estructural. *Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10*, 590.
- AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010b). Título A - Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. *Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10, Título A*, 1–174.
- Alcocer, S. M., Arce, J. C., Murià-Vila, D., & Guardia, D. A. (2020). Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica. *Inifed*, 1, 288.
- Chen, G. W., Omenzetter, P., & Beskhyroun, S. (2017). Operational modal analysis of an eleven-span concrete bridge subjected to weak ambient excitations. *Engineering Structures*, 151, 839–860. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.066>
- Gobernación de Santander. (2018). *Con sello histórico se restauró y modernizó Aula Máxima de la UIS*. <https://santander.gov.co/publicaciones/2352/con-sello-historico-original-se-restauro-y-modernizo-aula-maxima-de-la-uis/>
- Pastor, M., Binda, M., & Harčarik, T. (2012). Modal assurance criterion. *Procedia Engineering*, 48, 543–548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551>
- Testa, G., Bilotta, A., & Chioccarelli, E. (2021). Optimal sensor placement for dynamic identification of a reinforced concrete bridge. In FIB (Ed.), *Concrete structures: New Trends for Eco-efficiency and Performance* (pp. 1481–1490). International Federation for Structural Concrete. <https://doi.org/ISBN 978-2-940643-08-0>
- Universidad Industrial de Santander. (2018). *Mapa cultura UIS* (p. 1). UIS. <https://www.uis.edu.co/webUIS/es/administracion/direccionCultural/imagenes/mapaCulturaIUIS1.0.pdf>