






Diagnóstico de estructuras basado en vibraciones a partir de una red local de acelerógrafos

Vibration assessment to diagnose structures from a local network of accelerographs

Rosalín Méndez-Serrano¹, Margie E. Gómez-Ríos², Carlos A. Ho G.¹

¹Universidad Tecnológica de Panamá. Centro Experimental de Ingeniería. Lab. de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.

²Universidad Tecnológica de Panamá. Centro Experimental de Ingeniería. Laboratorio de Estructuras.

*Autor de correspondencia: rosalin.mendez@utp.ac.pa.

RESUMEN. La evaluación para establecer las necesidades de una estructura es bastante compleja y más si se requiere información que no está disponible. Por consiguiente, es necesario el análisis y estrategias experimentales; ya que las guías y normativas para la evaluación de estructuras existentes están limitadas al juicio ingenieril y particularidades de cada caso, lo cual hace que estas no puedan ser fácilmente definidas o estandarizadas.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación se enfoca en validar la eficiencia del análisis de vibraciones, para diagnosticar problemas estructurales, comparado con metodologías tradicionales que incorporan el uso de técnicas no destructivas en una estructura operativa. Para tales efectos, se presenta el caso de estudio de una edificación residencial, donde se evaluó un sistema de paredes que ha presentado de manera persistente agrietamientos; a pesar de que algunos de estos elementos fueron reemplazados completamente. Se efectuó un monitoreo de respuestas de vibraciones y la data se utilizó para elaborar modelos matemáticos, cuyos errores de ajuste sirvieron para el diseño de indicadores de daños que en conjunto con técnicas de *Machine Learning*, para el reconocimiento estadístico de patrones, se pudo caracterizar dinámicamente el sistema estudiado y diagnosticar que este no presentaba un desempeño anómalo que pudiera haber influenciado el comportamiento deficiente de los sistemas de mampostería.

Palabras clave. *Desempeño estructural, detección de daño, evaluación no destructiva, métodos de subespacio, monitoreo estructural, particiones de mampostería.*

ABSTRACT. To establish the needs of a structure is a complex task, especially if required information is not fully available. Hence, experimental analysis and strategies are necessary; since the guides and regulations for the evaluation of existing structures are limited to the engineering judgment and particularities of each case, which means that they cannot be easily defined or standardized.

Therefore, the objective of this research is focused on validating the efficiency of vibration analysis, to diagnose structural problems, compared with traditional methodologies that incorporate the use of non-destructive techniques in an operational structure. For this purpose, the case study of a residential building is presented, where a system of walls that have persistently cracked was evaluated; even though some of these elements were completely replaced.

Vibration responses were monitored, and the data was used to develop mathematical models, whose adjustment errors were used to design damage indicators that, together with Machine Learning techniques, for statistical pattern recognition, it could be dynamically characterized the objective system and diagnose that it did not present an anomalous performance that could have influenced the deficient behavior of the masonry systems.

Keywords. *Structural performance, damage detection, non-destructive assessment, subspace methods, structural monitoring, masonry partition.*

1. Introducción

Las técnicas constructivas no estandarizadas y defectos en el diseño o detallado, son algunas causas comunes del desempeño deficiente de las estructuras, cuyos efectos pueden ser minimizados si se entiende el comportamiento de cada componente [1]. Al respecto, en nuestro medio es común utilizar mampostería, de concreto o de arcilla, para generar divisiones o proteger de la intemperie, más que como elementos estructurales.

No obstante, usualmente estos sistemas de mampostería se construyen integrados con los elementos estructurales inmediatos, lo que impacta el comportamiento del conjunto ante las acciones externas, como lo son el viento o sismos. En este caso, se debe valorar que estos sistemas de mampostería tienen responsabilidad estructural, porque proporcionalmente a su rigidez reciben y deben transmitir parte de la demanda que se requiere resistir, lo que resulta en agrietamientos a pesar de que la seguridad de la estructura no está comprometida [2, 3, 4].

Es indiscutible que un mal desempeño de elementos no estructurales de mampostería, manifestado mediante grietas, en los estados iniciales impacta notablemente en el confort de los ocupantes, debido a la percepción de inseguridad que las grietas transmiten, y los costos inherentes de mantenimiento; ya que especialmente, se deteriora la protección de la edificación contra la intemperie [3]. Entonces, si estos problemas no son atendidos de manera oportuna, se puede llegar a comprometer la seguridad de la estructura.

El problema de evaluar una estructura en funcionamiento es bastante complejo, y más si se trata del escenario donde se tiene que incluir la participación de elementos no estructurales, cuyos detalles constructivos muchas veces ni siquiera están contemplados en los planos. En tales situaciones, es necesario un análisis con estrategias experimentales, ya que, las guías y normativas disponibles para la evaluación de estructuras existentes están limitadas al juicio ingenieril y particularidades de cada caso, lo cual hace que estas no puedan ser fácilmente definidas o estandarizadas [5].

El objetivo de esta investigación se enfoca en validar la eficiencia del análisis de vibraciones, para diagnosticar problemas estructurales, contra metodologías

tradicionales que incorporan el uso de técnicas no destructivas en elementos de una edificación operativa.

Los métodos basados en vibraciones utilizan la respuesta de la estructura para evaluar su estado e identificar el daño estructural [6]. Por lo tanto, se presentará el caso de estudio de un edificio residencial donde las particiones de mampostería, instaladas sobre losas postensadas típicas en canto libre, han presentado consistentes patrones de agrietamientos en la mayoría de los niveles. Es importante señalar que, en algunos casos los elementos deteriorados de la estructura evaluada han sido demolidos y reemplazados completamente; y, a pesar de ello, el patrón de daños sigue apareciendo repetidamente.

1.1 Alcance del estudio

Se examina el desempeño del análisis de vibraciones, con respecto a metodologías tradicionales para la evaluación no destructiva, a fin de determinar si las fisuras en las paredes de mampostería de una estructura están activas y tienen el potencial de progresar a mayor deterioro. Esto con la finalidad de ofrecer recomendaciones para el uso de los datos que se han colectado como parte de la actual norma de instrumentación sísmica que recomienda instrumentar estructuras con acelerógrafos y arreglos multisensores [7, 8].

Considerando que la estructura en cuestión estaba ocupada, el plan de muestro y experimentación en sitio tuvo que incluir la disponibilidad de los ocupantes de los apartamentos afectados; además que, esta circunstancia condicionó el plan de monitoreo estructural.

1.2 Configuración del documento

Este artículo está organizado en seis secciones principales. Esta sección es de carácter general, refiriéndose a la introducción, con detalles de los antecedentes del estudio y la descripción del contenido. Seguidamente, en la sección 2 se presenta el marco teórico del estudio y en la sección 3, sobre el caso de estudio, se presentan los datos generales de la edificación que fue evaluada y los elementos que la conforman. La sección 4 provee una descripción de los experimentos y procedimientos, incluyendo criterios de muestreo y metodologías de evaluación empleadas.

En la sección 5 se hace una exposición de los resultados obtenidos, acompañado de un análisis para la mejor interpretación y comprensión de la importancia de los hallazgos de este estudio.

Finalmente, la sección 6 contiene las conclusiones de la investigación.

2. Marco teórico

En ASCE 41-13 [9] se define el término partición como aquel componente vertical que no soporta carga y que provee división de espacios. Al respecto, en nuestro medio existe la concepción de ignorar las particiones en la etapa de diseño; lo cual es conservador y simplifica los procedimientos de cálculo [10]. En este sentido, especialmente cuando se trata de particiones pesadas, se requieren detalles en los planos que garanticen la estabilidad de esta y que no contribuya a la rigidez lateral de la estructura ni a resistir fuerzas; debido que estos elementos tienen la capacidad de inducir acciones no consideradas en el diseño, como lo es la torsión adicional [11]. Esto pasa debido que la interacción, que se desarrolla bajo la acción de fuerzas laterales, entre la estructura y los elementos no estructurales no es considerada debido a las simplificaciones del modelo. Por lo tanto, las particiones, de mampostería de concreto o de arcilla, pueden fallar debido a los esfuerzos, adicionales de flexión o de corte en el plano, que se generan por desplazamientos diferenciales y la falta de capacidad de los componentes [12].

Estudios previos han demostrado que, las particiones de mampostería en los edificios requieren contar con características para manejar los esfuerzos que se originan, producto del comportamiento de estas estructuras. De hecho, estos elementos son capaces de accionar mecanismos no deseados en el comportamiento de la estructura, con efectos desastrosos en el desempeño del edificio, al reducir la ductilidad del conjunto y dirigirlo a un posible colapso [10].

Recientemente en Panamá, el Reglamento Estructural Panameño REP-2021 [13] por primera vez incluye un capítulo dedicado a la mampostería en el cual se adoptan los Requerimientos y Especificaciones para Estructuras de Mampostería (*Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures*), TMS 402/602-16. En dicho documento se clasifica el diseño de las paredes construidas como rellenos de mampostería en no portantes y portantes, dependiendo si, en su plano la pared está estructuralmente aislada del sistema resistente lateral de la edificación. Es decir, este aislamiento en el plano se refiere a que existe una separación superior y lateral entre la pared y el marco delimitador o perimetral,

misma que debe estar libre de materiales que puedan permitir la transferencia de fuerzas entre el marco y la pared de mampostería; además de acomodar incluso los desplazamientos inelásticos. Las conexiones mecánicas de las paredes proveerán el soporte fuera de su plano y deben garantizar que exista continuidad en la trayectoria de la carga [14].

A pesar del avance incluido en el REP2021, la realidad es que la mayor parte de las paredes de mampostería de las estructuras existentes no cuentan con un diseño acorde a sus condiciones particulares de servicio y exposición. En general se observa que, en la mayoría de los casos, estos elementos están estructuralmente integrados al sistema resistente lateral y en otros casos, no cuentan con las condiciones de soporte que le provean la estabilidad necesaria para su correcto desempeño. Sumado a lo anterior, una práctica común para reducir los tiempos de ejecución de los análisis, especialmente en proyectos complejos, es modelar las plantas del edificio como un diafragma para redistribuir las acciones hacia el sistema portante lateral; lo cual tiene como consecuencia que cada elemento individual asuma una carga proporcional a su rigidez lateral [15].

La recolección de información que sea representativa para el diagnóstico preciso del estado estructural de un sistema permitiría la toma de decisiones acertadas para el establecimiento de estrategias conducentes a mitigar o eliminar el efecto del daño. Usualmente, las metodologías tradicionales resultan costosas; lo cual se ha convertido en una oportunidad para el desarrollo de métodos que han hecho posible inferir de manera indirecta el estado de una estructura.

El conjunto de estrategias para la identificación de sistemas, detección de daño y la actualización de modelos es lo que se conoce como monitoreo de la salud estructural, lo cual engloba una serie de procesos que incluyen instrumentación, mediciones de la respuesta y la evaluación del estado de la estructura [16]. Específicamente, para la detección de daños se requiere el desarrollo de escenarios potenciales de mecanismos de deterioro, la observación del sistema durante un periodo de tiempo, la obtención de información a partir de las mediciones efectuadas con el fin de establecer indicadores y cuantificar las características sensibles al daño, así como el análisis de dichos indicadores para establecer la condición actual del sistema monitoreado [17, 18].

El monitoreo estructural es ampliamente reconocido como una valiosa herramienta que permite tomar decisiones con respecto al mantenimiento, reconstrucción y reparación de las facilidades evaluadas; lo cual permite disminuir costos en mantenimiento y mejorar el nivel de seguridad de las estructuras [19].

El uso de mediciones de las respuestas de sistemas estructurales *in situ*, para inferir su comportamiento y un desempeño anómalo se ha convertido en un método confiable para su evaluación, entendimiento de la evolución del daño y mecanismos de colapso [20]. Sin embargo, no hay consenso en la efectividad de diversos indicadores propuestos para identificar daño, debido que la incertidumbre en las aplicaciones, derivada del proceso de recolección, procesamiento de la data y del medio ambiente, dificulta la correcta identificación de este [21].

Tradicionalmente, los métodos para identificar daño se han enfocado en localizar cambios en los parámetros dinámicos de una estructura a fin de determinar la presencia de este. En tal sentido, se entiende por daño al deterioro de la estructura que altera su rigidez de manera localizada y su capacidad de disipar energía, ya sea por el paso del tiempo, defectos o eventos fortuitos, viéndose afectadas sus características dinámicas [22]. No obstante, aunque la física de una estructura es de fácil interpretación, en la práctica la cantidad de recursos que se deben disponer hacen que su implementación sea ineficiente [21, 23]. Este concepto ha evolucionado hacia aplicaciones más confiables que integran procesos de *Machine Learning* (ML), interrogación de datos y caracterización estadística que permite parámetros robustos y con una definición de daño que comprende cambios en los materiales y/o la geometría del sistema, como lo son alteraciones en las condiciones de borde y en la conectividad, lo cual redundará adversamente en su desempeño [24].

3. Caso de estudio

3.1 Descripción geométrica de la estructura

Se trata de una edificación para uso residencial, de 16 niveles y un semi-sótano. Su distribución arquitectónica consta de dos torres independientes que comparten un módulo inferior, donde se ubican los primeros 3 niveles, dedicados al vestíbulo, los estacionamientos y el área

social. El resto de la estructura está destinada a apartamentos, distribuidos en 5 unidades por nivel.

El sistema de fundaciones es de tipo profunda con pilotes vaciados en sitio.

El sistema para fuerza lateral está compuesto por una estructura principal de concreto que combina un sistema de columnas y muros reforzados, conectados mediante elementos de placas sólidas postensadas, que actúan como receptor de las cargas de gravedad. Los sistemas de muros se concentran en la parte central de la planta de cada torre y estos alojan los mecanismos de ascensores y las escaleras.

La losa postensada es de 20cm de espesor, excepto en la parte posterior de la edificación, donde dicha losa es de 24cm de espesor y se proyecta en un voladizo de 3.50m de extensión. Sobre dicho voladizo está un apartamento típico, que se denomina tipo D y es donde se encuentran todas las particiones del edificio que muestran daños.

4. Materiales y métodos

El monitoreo de estructuras involucra un proceso para la selección de los sensores que se utilizarán, su ubicación, cantidad y el medio de recolección de la data [17]. Igualmente, la ejecución de inspecciones preliminares y el registro de daños existentes, es requerido para el establecimiento de la condición de referencia de la estructura y para evaluar visualmente el comportamiento anómalo que requiere ser reconocido. Estos aspectos fueron contemplados en el diseño del plan de experimentación, acorde a las condiciones *in situ*. Por ejemplo, la selección de los elementos que se muestrearon estuvo sujeta a la disponibilidad de los ocupantes de los apartamentos afectados.

Por tratarse de una edificación en operación, el plan de monitoreo comprendió el uso metodologías no invasivas para la evaluación, que se extendió por 6 meses. En el plan experimental se implementaron técnicas no destructivas tradicionales y procedimientos para el monitoreo de estructuras mediante el análisis de respuestas de vibraciones; con el objeto de detectar la posible evolución del daño.

4.1 Monitoreo mediante técnicas no destructivas tradicionales

El plan de monitoreo mediante técnicas tradicionales apuntó al seguimiento de posibles movimientos en las

grietas existentes en paredes, de acuerdo con el siguiente protocolo:

- Instalación de dispositivos de tipo fisurómetro estándar y monitor de movimiento en combinación con mediciones utilizando comparadores de grietas.
- Verificación de distorsiones geométricas por el exterior de la estructura, utilizando una estación total Geomax Zoom 30 Pro, mini prisma Leica tipo GMP111, trípode, GPS Garmin 60Csx y cinta métrica.
- Revisión de las deflexiones en losas en voladizo con un nivel marca Johnson de 1.20m de longitud y nivel de manguera.
- Exploración de las paredes para detectar elementos de refuerzo u otros componentes embebidos en estas, utilizando técnicas de radar, en este caso: detector portátil Wallscanner D-tect 150 y el radar de penetración de superficies Handyscan GSSI.

4.2 Análisis de respuestas de vibraciones

La configuración del plan de muestreo se enfocó en obtener características dinámicas confiables, minimizar el desplazamiento de los sensores entre ensayos, asegurar la comunicación apropiada entre los dispositivos. La adquisición de datos requirió un sistema de comunicación en red conectado mediante cables de cobre, para proveer una captura de datos más robusta.

Se obtuvieron registros de acelerogramas para elaborar modelos de la respuesta del sistema y se implementó un algoritmo de reconocimiento de patrones para detectar si existen variaciones entre los registros de referencia y los recolectados durante el periodo de monitoreo.

El monitoreo de la respuesta de vibraciones de la estructura consideró la selección de 3 losas consecutivas, que fueron instrumentadas para medir su respuesta con equipos marca Kinematic modelo Etna2. Este procedimiento consideró la geometría de los elementos y su configuración estructural. Al respecto, la figura 1 muestra una imagen de la vista de elevación de una de las torres de la estructura evaluada, con un recuadro y etiquetas que resaltan el detalle de los niveles instrumentados.

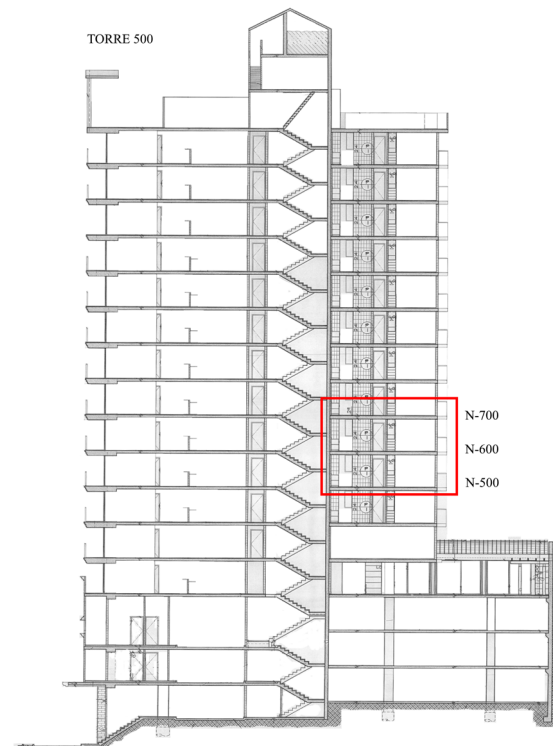


Figura 1. Vista de elevación que muestra los niveles instrumentados.
Fuente: Adaptado de [25]

Las características dinámicas de la estructura fueron evaluadas mediante ensayos de vibraciones bajo condiciones de ruido ambiental y la aplicación de impulsos controlados en los grados de libertad de interés; como se detalla: ruido ambiental; un impulso simultáneamente aplicado en todos los niveles en la posición 2 y luego en la posición 3; y en el nivel central únicamente, un impulso individual aplicado en la posición 2 y otro en la posición 3. Nueve acelerógrafos triaxiales fueron utilizados para instrumentar las tres losas en canto libre, específicamente los niveles N-500, N-600 y N-700 del edificio en cuestión. El interés se enfocó en monitorear los modos verticales ya que estos son los que, en condiciones de cargas de gravedad, tienen mayor interacción con las paredes, los modos traslacionales se monitorearon como referencia.

En cada losa se instalaron tres acelerógrafos, como se observa en la figura 2, uno en el punto de apoyo de la losa (N°1), y los otros dos en el extremo en canto libre de la losa, posicionando uno en la parte central (N°2) y el otro en el vértice libre (N°3).

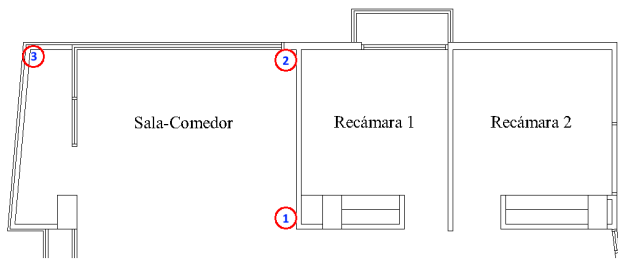


Figura 2. Vista de planta con las posiciones de los sensores en cada nivel.
Fuente: Los autores.

4.3 Procedimiento de análisis

En [26] se propone un método para normalizar la data que asume la existencia de señales que son adquiridas bajo diferentes condiciones operacionales y ambientales. Dichas condiciones son desconocidas, excepto la condición de referencia. En este estudio, el daño que presenta la estructura es evidente y lo que se desea investigar es si el daño continúa evolucionando, de forma que se pueda comprometer la seguridad estructural del edificio. Por lo tanto, la condición base estará representada por el estado de la estructura en el momento de inicio de este estudio.

El análisis de la data consideró modelos de predicción Autoregresivos (AR), que han sido utilizados en diversos estudios para la obtención de indicadores de daño porque solo requiere la señal de respuesta.

Un modelo Autoregresivo AR(p) puede ser escrito de la siguiente manera:

$$x(t) = \sum_{j=1}^p \phi_{xj} x(t-j) + \epsilon_x(t) \quad (1)$$

En esta ecuación $x(t)$ es la señal autoregresiva discreta, $\epsilon_x(t)$ es el error aleatorio de ajuste, p es el orden y ϕ_{xj} corresponde a los coeficientes del modelo.

El indicador de daño seleccionado para la evaluación de la data de vibraciones es el promedio del error de ajuste o residuo de un paso del modelo AR, que se define como:

$$\epsilon_x(t) = x(t) - \sum_{j=1}^p \phi_{xj} x(t-j) \quad (2)$$

4.3.1 Preprocesamiento de la data

La efectividad de los algoritmos para el análisis y evaluación de datos está muy ligada a la calidad de estos [27]. Por lo tanto, el preprocesamiento es un paso esencial en la manipulación de dichos datos y este abarca diferentes operaciones para su depuración, integración, transformación y consolidación [28]. Por lo tanto, una de las primeras acciones es la eliminación de tendencias y la normalización de las historias de aceleraciones mediante la remoción del promedio de la muestra (\bar{x}) por el inverso de la desviación estándar de esta ($\frac{1}{\sigma^2}$).

Para la determinación del orden del modelo Autoregresivo se empleó el Criterio de Información de Akaike (AIC) [29] que resultó en un valor para $p = 35$. Cada conjunto de datos fue dividido en segmentos de 350 datos con una superposición de 300 datos entre segmentos consecutivos y para el análisis estadístico se consideraron subgrupos de 4 grupos de datos.

4.4 Control estadístico del proceso

Un gráfico de control es la representación de un parámetro de calidad que se ha medido o calculado a partir de una muestra y su evolución es comparada en el tiempo. Este tipo de gráficos contiene una línea central que representa el valor promedio del indicador cuando está en control; los límites estadísticos de control superior e inferior, representados por dos líneas horizontales, indican que el proceso está en control, cuando las muestras entran dentro de dichos límites [30]. Por lo tanto, el diagnóstico de una estructura se basa en un proceso de valoración estadística donde se emplearán gráficos de control para el monitoreo de los indicadores de daño seleccionados, ya que esta herramienta permite considerar el efecto de fuentes adicionales de variabilidad [26].

La obtención de características sensibles al daño y la construcción de límites estadísticos son dos factores cruciales a la hora de establecer la efectividad de un algoritmo estadístico para el reconocimiento de patrones [23, 31].

El control estadístico para la detección de daño en procesos basados en vibraciones proporciona una herramienta para monitorear el desempeño de estructuras y para identificar nuevos datos que no sean consistentes con los anteriores.

En este estudio las gráficas de control serán utilizadas para monitorear los indicadores de daño seleccionados;

es decir, el promedio y la desviación estándar del error de ajuste de un modelo Autoregresivo.

Lo anterior es válido ya que, por tratarse de data experimental esta posee naturalmente incertidumbres que deben considerarse para establecer de manera cuantificable si los cambios en la respuesta del edificio son debido a la evolución del daño en lugar de variaciones operacionales o ambientales [26].

5. Resultados y discusión

5.1 Técnicas no destructivas tradicionales

Se instalaron 9 dispositivos para el monitoreo de las grietas en cuatro de las paredes dañadas. Dichos instrumentos mostraron que los agrietamientos en las paredes estaban estables, ya que no registraron movimientos relevantes. En este sentido, durante el periodo de monitoreo solo cuatro de los dispositivos registraron movimientos en fisuras igual o menor de 0.2mm.

Por el exterior del edificio, mediante controles de topografía, se verificó el posible desarrollo o evolución de deflexiones en las losas de canto libre, donde están ubicados los apartamentos tipo D. Al respecto se consideraron mediciones de deflexiones verticales y desplazamientos laterales; los cuales, al igual que el caso de los agrietamientos en las paredes, no mostraron cambios importantes.

Similar a los casos anteriores, en el interior de los apartamentos, las deflexiones medidas en las losas afectadas no fueron significativas, siendo el valor máximo equivalente al 0.25% de la longitud de la porción en voladizo de esta.

La exploración de los elementos de mampostería, mediante técnicas de radar, no reveló que estos posean componentes de amarre o barras de refuerzo embebidas.

5.2 Monitoreo de respuesta de vibraciones

Una fase fundamental en el monitoreo estructural es la identificación del sistema; por lo tanto, se caracterizó dinámicamente el conjunto de losas monitoreado. Para los efectos indicados, se empleó un método de subespacio para la identificación de sistemas dinámicos, el *Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification* (N4SID) desarrollado por Van Overschee y De Moor [32]. Este es un algoritmo basado en la teoría de realizaciones y que utiliza los estados combinados del filtro de Kalman de estado no

estacionario. Para el análisis e interpretación de datos el N4SID tiene integrado la estimación de la función de correlación para la compresión y obtención de los Componentes Principales (PCA) y utiliza la Descomposición en Valores Singulares (SVD), características que lo hacen un algoritmo bastante eficiente [33, 34]. La estimación del orden del sistema se realiza aplicando el Criterio de Aseguramiento Modal (MAC), el cual evalúa el grado de correlación de las formas modales y provee una medida del grado de consistencia entre las estimaciones, lo cual nos permite detectar modos espurios [35, 36]. Estos modos surgen como un artefacto matemático que resulta del tratamiento numérico que recibe la data durante su análisis.

Para determinar las características del sistema, se consideró que este converge si cumple los siguientes criterios:

$$\text{MAC} > 0.90$$

$$\text{Error en la frecuencia} \leq 2\%$$

$$\text{Error en el cálculo de Amortiguamiento} \leq 5\%$$

En la figura 3 se muestra el diagrama de estabilización y la función de respuesta de frecuencias, donde se observa como las propiedades modales del sistema convergen claramente, luego de filtrar modos espurios y para los criterios evaluados, en las frecuencias de 16.4, 19.4, 24.4, 26.4, 35.2 y 37.7 Hertz.

Igualmente, en la figura 4 se ilustran las seis (6) formas modales identificadas en cada una de las frecuencias ya indicadas.

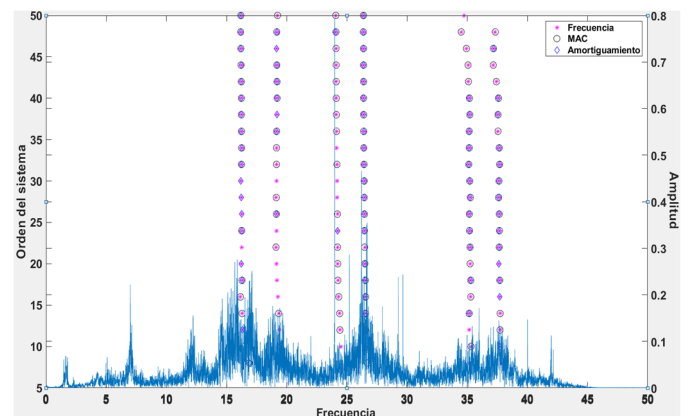


Figura 3. Diagrama de estabilización.

Fuente: Los autores.

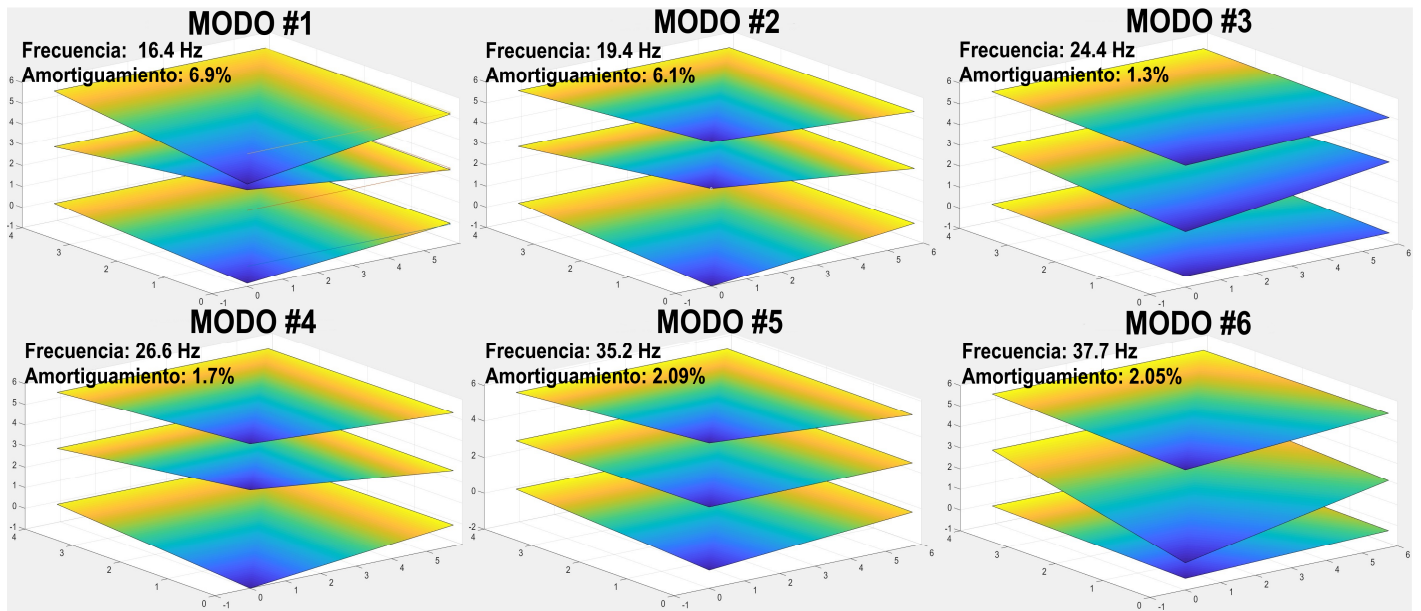


Figura 4. Caracterización dinámica del sistema de losas monitoreado.
 Fuente: Los autores.

La ejecución de ensayos de vibraciones consideró la recolección de registros de aceleraciones para realizar análisis modal y del comportamiento de la estructura mediante la implementación de indicadores sensibles al daño.

Se seleccionaron 3 apartamentos consecutivos verticalmente para estudiar un conjunto de paredes. Las observaciones del sistema se obtuvieron a partir del arreglo de sensores, colectando mediciones de la respuesta dinámica, muestreada a una frecuencia de 100Hz.

En la figura 5 y figura 6 se muestran los gráficos de control de \bar{x} para dos de los sensores utilizados. Cabe señalar que también se elaboraron las gráficas de control de la desviación estándar, pero esta no brindó resultados satisfactorios.

En ambas gráficas, el símbolo \times representa la data utilizada como referencia de la condición de la estructura y para el entrenamiento del algoritmo, estableciendo los límites estadísticos superior e inferior. Para la definición de dichos límites estadísticos se consideró una confiabilidad de 5% y se estimaron de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\pm z_{\alpha/2} s_p / \sqrt{n} \quad (3)$$

Donde s_p es la raíz cuadrada de la varianza de los subgrupos en el registro de errores de ajuste para la data de referencia; z_{α} representa el α -cuantil de la distribución normal estándar.

El símbolo + representa el resultado de la evaluación del indicador de daño para los registros recolectados después del establecimiento de la condición de referencia. Como se puede ver, en ambos ejemplos se observa que todos los datos están dentro de las líneas que limitan la máxima dispersión de la data para que se considere que se ha detectado daño.

Al respecto, se observa que la clasificación de la data está conforme con los resultados obtenidos utilizando métodos no destructivos tradicionales.

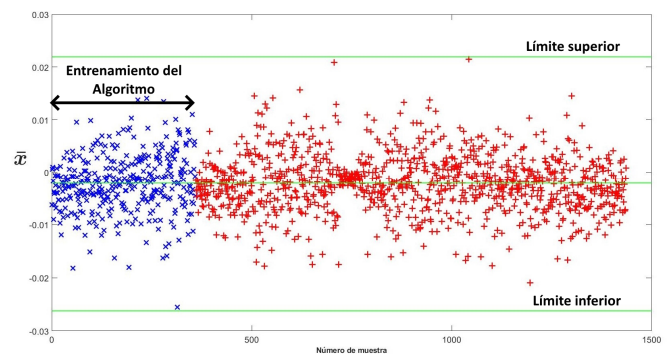


Figura 5. Resultado de la identificación de daño, posición 3 del nivel 500.
 Fuente: Los autores.

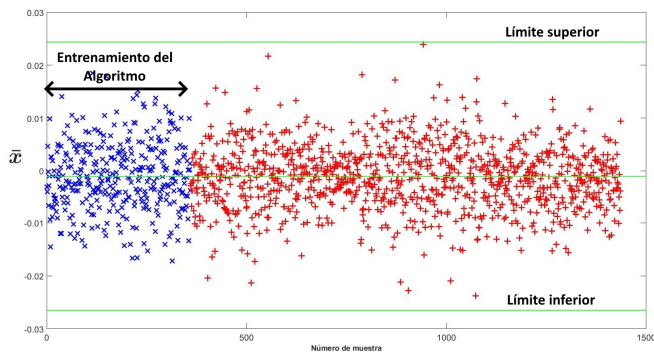


Figura 6. Resultado de la identificación de daño, posición 3 del nivel 600.
Fuente: Los autores.

5.3 Discusión

El diagnóstico de la condición estructural de una edificación, en cuanto a la presencia de un comportamiento adverso a su desempeño, está relacionado a la identificación de cambios significativos en los parámetros seleccionados como indicadores de daño. Por lo tanto, el objetivo es el desarrollo de un esquema para el diagnóstico de daño utilizando técnicas de minería de la información para el análisis de los datos de respuesta de aceleraciones de la estructura y compararla con los resultados obtenidos mediante metodologías tradicionales.

Se ejecutaron pruebas dinámicas de vibración a partir de impulsos artificiales aplicados de manera controlada en los grados de libertad de cada nivel resaltado en la figura 1 y en las posiciones indicadas en la figura 2.

El empleo de gráficos de control estadístico permite distinguir entre valores atípicos que no necesariamente indican que existe daño, sino que el sistema ha variado a causa de cambios estadísticamente significativos en su desempeño.

Los resultados obtenidos mediante técnicas de monitoreo tradicional y análisis de vibraciones estuvieron acordes, evidenciando que la estructura analizada durante el periodo de monitoreo mostró un desempeño adecuado, de acuerdo con el comportamiento esperado. Además, se evidencia que el agrietamiento de los elementos de mampostería se debe a defectos por la carencia de detalles estructurales que permitan el confinamiento de dichos elementos.

6. Conclusiones

En este estudio se integraron metodologías para la evaluación de la condición de la estructura y la

caracterización de las fisuras existentes; a continuación, se presentan las conclusiones más relevantes:

- Se utilizaron técnicas basadas en el reconocimiento estadístico de patrones para detectar que el daño, observado en elementos no estructurales, está pasivo.
- Las evidencias de este estudio indican que la aparición de los agrietamientos en las paredes de mampostería de la estructura estudiada, no son consecuencia de un comportamiento estructural deficiente del sistema de losa en voladizo, asociado a deflexiones y desplazamientos laterales del edificio, que puedan considerarse excesivos.
- La adecuada selección del indicador de daño es crucial para el buen desempeño del sistema de monitoreo estructural. En nuestro caso, el uso de la desviación estándar de los errores por ajustes a un modelo autoregresivo, no brindó un resultado estable para la condición de referencia; por lo tanto, se consideró como un indicador deficiente.
- A pesar de que el reconocimiento estadístico de patrones, para el parámetro del valor medio del error de ajuste de modelos autoregresivos, mostró un resultado satisfactorio, debemos reconocer que la estructura no puso a prueba este algoritmo en el caso que hubiera existido daño. Por lo tanto, este aspecto debe considerarse para futuras investigaciones.
- Este resultado destaca la necesidad de investigaciones que abarquen periodos de monitoreo mayores para evaluar el desempeño de diferentes indicadores ante daño global y local, y considerando acciones como vientos o sismos.
- En la actualidad, la posibilidad de sistemas para el monitoreo permanente de estructuras es mucho más factible, lo cual repercute en la posibilidad de tener acceso a más data para hacer posible análisis estadísticos y la caracterización de las incertidumbres que afectan la data.

AGRADECIMIENTOS

Al personal técnico del Centro Experimental de Ingeniería y del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas que colaboró en la ejecución de los ensayos.

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Programa de Instrumentación Sísmica de la República de Panamá.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Autor	Contribución	Porcentaje
RM	Diseño de los ensayos y análisis de datos de registros de aceleraciones. Y desarrollo del manuscrito.	50
MG	Dirección de ensayos de campo, análisis e interpretación de la data de ensayos no destructivos tradicionales.	25
CH	Diseño de la red de acelerógrafos y recolección de la data en campo.	25

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] ACI Committee 224, ACI 224.1R-07 Causes, evaluation, and repair of cracks in concrete structures, American Concrete Institute, 2007.
- [2] G. K. Al-Chaar, Evaluating strength and stiffness of unreinforced masonry infill structures, US Army Corps of Engineers, 2002.
- [3] A. Casado Lordsleem Jr., "Cracks of masonry partition walls in multifloor building: Case study," in *Case studies of building pathology in cultural heritage*, vol. 7, J. M. Delgado, Ed., Singapore, Springer, 2016, pp. 183-198.
- [4] L. M. Silva, G. Vasconcelos and P. B. Lourenço, "Innovative systems for earthquake-resistant masonry infill walls: characterization of materials and masonry assemblages," vol. 39, p. 102195, 1 July 2021.
- [5] American Society of Civil Engineers, SEI/ASCE 11-99. Guideline for structural condition assessment of existing buildings, Structural Engineering Institute, 2000.
- [6] O. Avci, O. Abdeljaber, S. Kiranyaz, M. Hussein, M. Gabbouj and D. J. Inman, "A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 147, no. 2021, p. 107077, 2021.
- [7] Junta Técnica de Ingeniería y Arquitectura, *Reglamento Estructural Panameño*, Panamá: Ministerio de Obras Públicas, 2014.
- [8] Junta Técnica de Ingeniería y Arquitectura, *Resolución de la JTIA 060 de junio de 2013*, Panamá: Ministerio de Obras Públicas, 2013.
- [9] American Society of Civil Engineers, ASCE 41-13 Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, 2013.
- [10] V. Nicoletti, D. Arezzo, S. Carbonari and F. Gara, "Vibration-based Tests and Results for the Evaluation of Infill Masonry Walls Influence on the Dynamic Behaviour of Buildings: A Review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, pp. 3773 - 3787, 2022.
- [11] Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México, Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de México, México, 2020.
- [12] Federal Emergency Management Agency, FEMA-172 NEHRP Handbook of techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, 1992.
- [13] Junta Técnica de Ingeniería y Arquitectura, "Reglamento para el diseño estructural de la República de Panamá (REP-2021)," Panamá, 2022.
- [14] Masonry standards joint committee (MSJC), Building code requirements and specification for masonry structures, The masonry society, 2016.
- [15] T.-C. Pan, X. You and J. M. Brownjohn, "Effects of Infill Walls and Floor Diaphragms on the Dynamic Characteristics of a Narrow Rectangle Building," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 35, no. 5, pp. 637 - 651, 2006.
- [16] H. Sohn, C. R. Farrar, F. Hemez and J. Czarnecki, "A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996 – 2001," in *The 3rd World Conference on Structural Control. Structural Control*, 2002.
- [17] C. R. Farrar, T. A. Duffey, S. W. Doebling and D. A. Nix, "A statistical pattern recognition paradigm for vibration-based structural health monitoring.," in *2nd International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA, 1999.
- [18] A. Rytter, "Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures," *Fracture and Dynamics*, vol. R9314, no. 44, 1993.

- [19] M. Desbazeille, N. S. Sprynski, V. Cattin, M. Billères, L. Jouanet and A. Vidal, "Monitoring of bridges by using static and dynamic data from MEMS accelerometers," in *Civil Structural Health Monitoring: Proceedings of CSHM-8 Workshop*, Springer International Publishing, 2021, pp. 725 - 745.
- [20] F. Benedettini, A. De Sortis and M. Giuliano, "In field data to correctly characterize the seismic response of buildings and bridges," *Bulletin of earthquake engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 643-666, 2017.
- [21] M. P. Limongelli and P. F. Giordano, "Vibration-based damage indicators: a comparison based on information entropy," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 10, no. 2, pp. 251-266, 2020.
- [22] S. S. Saidin, S. A. Kudus, A. Jamadin, M. A. Anuar, N. M. Amin, A. B. Z. Ya and K. Sugiura, "Vibration-based approach for structural health monitoring of ultra-high-performance concrete bridge," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, no. 2023, pp. 1752-1764, 2023.
- [23] R. Yao and S. N. Pakzad, "Autoregressive statistical pattern recognition algorithms for damage detection in civil structures," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 31, pp. 355 - 368, 2012.
- [24] H. Sohn and C. R. Farrar, "Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals," *Smart materials and structures*, vol. 10, no. 3, pp. 446 - 451, 2001.
- [25] *Planos con detalles arquitectónicos y estructurales de edificio residencial*, Panamá, 2010.
- [26] M. L. Fugate, H. Sohn and C. R. Farrar, "Vibration-Based Damage Detection Using Statistical Process Control," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 15, no. 4, pp. 707-721, 2001.
- [27] S. García, S. Ramírez-Gallego, J. Luengo and F. Herrera, "Big Data: Preprocesamiento y calidad de datos," *novática*, vol. 237, pp. 17 - 23, 2016.
- [28] S. García, J. Luengo and F. Herrera, *Data preprocessing in data mining*, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [29] P. J. Brockwell and R. A. Davis, *Introduction to time series and forecasting*, New York: Springer New York, 2002.
- [30] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, 6th edición ed., Jefferson, Arizona: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [31] S. W. Doebling and C. R. Farrar, "Statistical damage identification techniques applied to the I-40 bridge over the Rio Grande River (No. LA-UR-97-4401; CONF-980224-)," in *16yh International Modal Analysis Conference*, Santa Barbara, CA, 1997.
- [32] P. Van Overschee and B. De Moor, "N4SID: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems," *Automática*, vol. 30, no. 1, pp. 75 - 93, 1994.
- [33] R. Brincker and C. Ventura, *Introduction to operational modal analysis*, John Wiley & Sons, 2015.
- [34] P. Van Overschee and B. De Moor, "Subspace identification for linear systems: Theory-Implementation-Applications," *Springer Science & Business Media*, 2012.
- [35] R. J. Allemang, "The Modal Assurance Criterion - Twenty Years of Use and Abuse," *Sound and vibration*, vol. 37, no. 8, pp. 14 - 23, 2003.
- [36] W. Heylen, S. Lammens and P. Sas, *Modal Analysis Theory and Testing*, Leuven: Katholieke Universteit Leuven, Departement Werktuigkunde, 2006.