

CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN EDIFICIO EXPERIMENTAL MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL Y VIBRACIÓN FORZADA

Laura Gabriela Ortiz-Huerta⁽¹⁾ y Luis Humberto Mendoza Garcilazo⁽²⁾

RESUMEN

En este trabajo se analizan registros de vibración ambiental y de vibración forzada para determinar las propiedades dinámicas (formas modales y frecuencias características) de un edificio experimental de cinco pisos que fue construido a escala real dentro del laboratorio Charles Lee Powell de la Universidad de California en San Diego (UCSD). Este fue el primer edificio a escala real, construido en el año 1992, para realizar pruebas de resistencia sísmica en los Estados Unidos de América. Los registros de vibración se obtuvieron durante las tres etapas de las condiciones físicas del edificio: edificio recién construido, edificio dañado con carga sísmica simulada y edificio reparado. En los resultados del análisis, tanto de vibración ambiental como forzada, se observan cambios en sus propiedades dinámicas debido a la degradación de la rigidez en el edificio con daño y a la recuperación de la rigidez en el edificio reparado.

Palabras clave: edificio experimental; laboratorio Charles Lee Powell; vibración ambiental; vibración forzada; formas modales; frecuencias características

CHANGES IN THE DINAMIC PROPERTIES OF AN EXPERIMENTAL BUILDING BY THE ANALYSIS OF AMBIENT AND FORCED VIBRATION

ABSTRACT

Records of ambient and forced vibration are analyzed to determine the dynamic properties (modal forms and characteristic frequencies) of an experimental five-story full-scale reinforced masonry building in the Charles Lee Powell Laboratory at the University of California, San Diego (UCSD). It was the first full-scale building, built in 1992, for earthquake resistance testing in the United States of America. Vibration records were obtained during the three stages of the building: newly constructed, damaged under simulated seismic load, and repaired. The analysis of both, ambient and forced vibrations,

Artículo recibido el 28 de 07 de 2021 y aprobado para su publicación el 27 de 02 de 2022. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Departamento de Oceanografía Física, División de Oceanología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), Carretera Ensenada-Tijuana Núm. 3918, Zona Playitas, Ensenada, Baja California, México, C.P. 22860. lortiz.huerta@gmail.com; ortizlg@cicese.mx

⁽²⁾ Grupo Sismología Aplicada a Ingeniería, Departamento de Sismología, División Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), Carretera Ensenada-Tijuana Núm. 3918, Zona Playitas, Ensenada, Baja California, México, C.P. 22860. lmendoza@cicese.mx

are revealing changes in their dynamic properties due to the loose of rigidity in the damaged building, and the recovery of the rigidity in the repaired building.

Keywords: experimental building; Charles Lee Powell laboratory; ambient vibration; forced vibration; modal forms; characteristic frequencies

INTRODUCCIÓN

En el año de 1992 se construyó el primer edificio a escala real para realizar pruebas de resistencia sísmica en los Estados Unidos de América. La obra fue financiada por “*The National Science Foundation*” (NSF), “*The Department of Energy*”, la industria del bloque, en particular, “*The Masonry Association of California and Nevada*”, y “*The Masonry Institute of America*”. El edificio experimental de cinco pisos fue construido dentro del laboratorio Charles Lee Powell de la UCSD. El grupo de Sismología Aplicada a Ingeniería, del Departamento de Sismología del CICESE, participó en forma colaborativa en este proyecto por invitación del Dr. J. Enrique Luco, profesor de la UCSD. El CICESE participó con instrumentación sísmica durante las pruebas de resistencia sísmica, con la finalidad de estudiar los cambios en las propiedades dinámicas del edificio mediante el análisis de sus vibraciones. Los resultados que se presentan en este trabajo consisten en la identificación de frecuencias características y formas modales del edificio experimental, empleando los métodos clásicos de análisis espectral y de funciones de transferencia (admitancia, coherencia y desfase) entre las diferentes caras y niveles del edificio en sus tres etapas: edificio sin daño, refiriéndose al edificio recién construido; edificio con daño, refiriéndose al edificio dañado por medio de una simulación de carga sísmica mediante un sistema de cargas laterales aplicadas con diez actuadores hidráulicos servo-controlados, y edificio reparado, utilizando técnicas de reparación para edificios de bloque de concreto. Este conjunto de observaciones, tanto de vibración ambiental como de vibración forzada, se ha venido empleando con fines didácticos y, típico de un buen conjunto de observaciones, su valor didáctico ha aumentado al paso de los años. Es por ello que este trabajo se presenta en conmemoración del 35 aniversario del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C. (CIRES), para ilustrar cómo este tipo de experimentos de instrumentación y registro sísmico, contemporáneos a la creación del CIRES, así como los métodos clásicos de análisis espectral, han prevalecido al paso de los años para identificar las formas modales de un edificio y, en su caso, para interpretar los cambios en sus formas modales (e.g., De-la-Colina y Valdés-González, 2021; Pepi *et al.*, 2021; Motamedi *et al.*, 2021; Khanmohammadi *et al.*, 2021; Chakra-Varthy y Basu, 2021; Inci *et al.*, 2021; Souici *et al.*, 2021; Casas-Guzik, 2019; Henaó *et al.*, 2014).

Antecedentes

Edificio sin daño

El edificio (Figuras 1 y 2) es de bloque de concreto reforzado con varilla, como se indica en la Figura 1. Los niveles se refieren a la base de cada pared, comenzando con el nivel 0 en la base y terminando con el nivel 5 en la azotea. El nivel 0 o base, es de concreto reforzado y debajo de éste se encuentra el piso del laboratorio Charles Lee Powell Structural System de la UCSD.

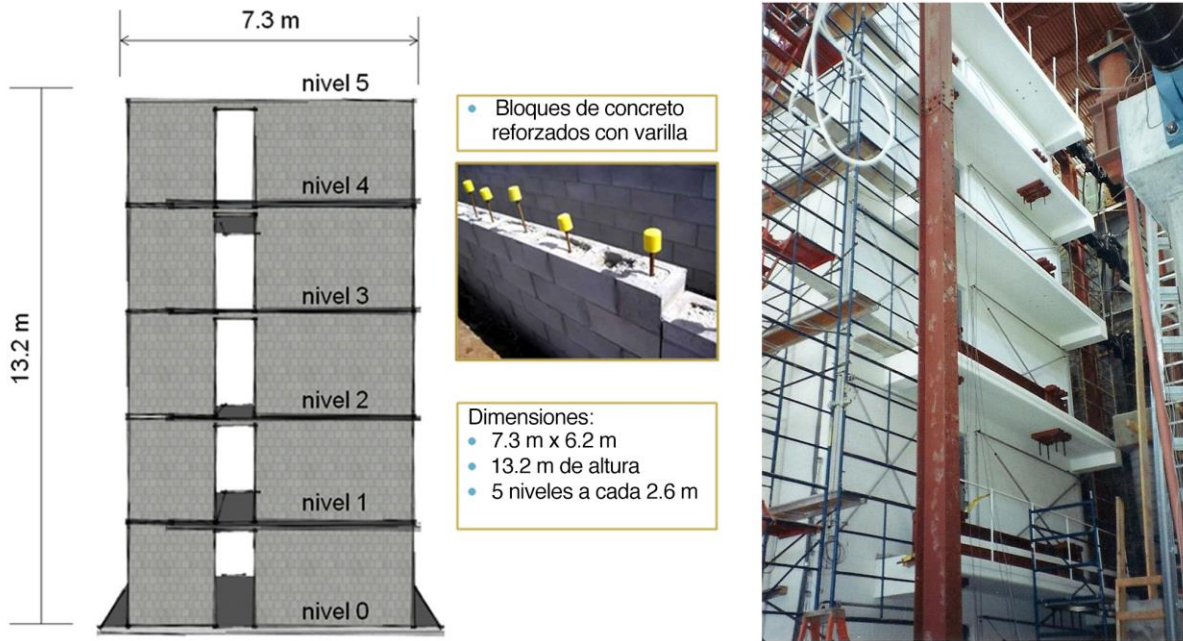


Figura 1. Fachada frontal (cara Este) y dimensiones del edificio. Al fondo de la fotografía del edificio se aprecia una pared de reacción con actuadores hidráulicos aplicando fuerzas a lo largo de la cara Este en cada uno de los niveles del 1 al 5. Fotografía: Luis H. Mendoza 1992.

ISSN-e 2395-8251

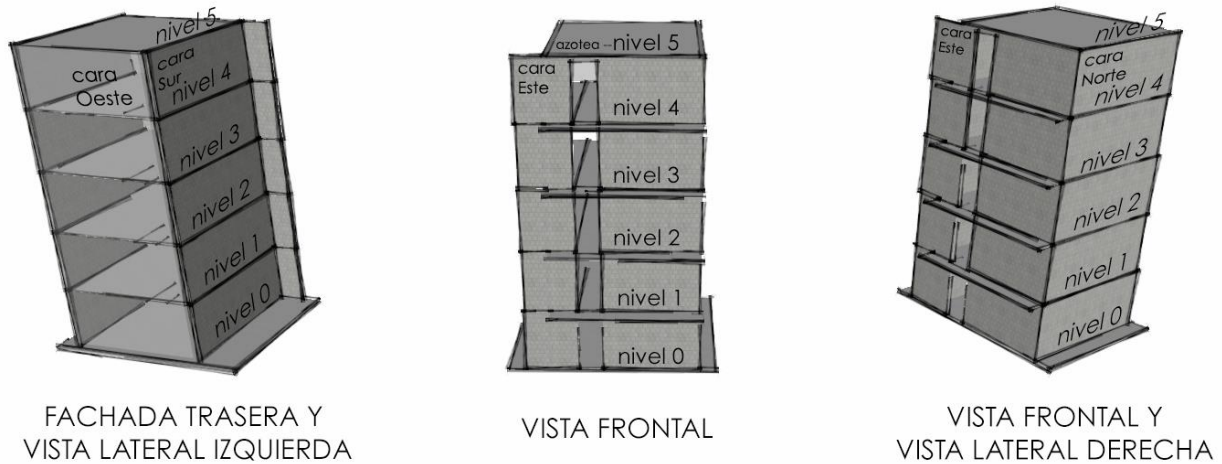


Figura 2. Vistas frontal y trasera y laterales del edificio.

La cara norte del edificio se construyó paralela a una pared de reacción en donde se apoya un conjunto de actuadores hidráulicos para aplicar cargas al edificio en cada uno de los pisos o niveles. La pared de reacción y la distribución de los actuadores hidráulicos se muestran en la Figura 3. Note que la cara Oeste no tiene pared en ninguno de sus niveles debido a que el edificio es solamente un módulo o subsección de una estructura simétrica tipo cajón, formada por paneles verticales y horizontales conectados para proporcionar continuidad, como se ilustra de forma esquemática en la Figura 4.

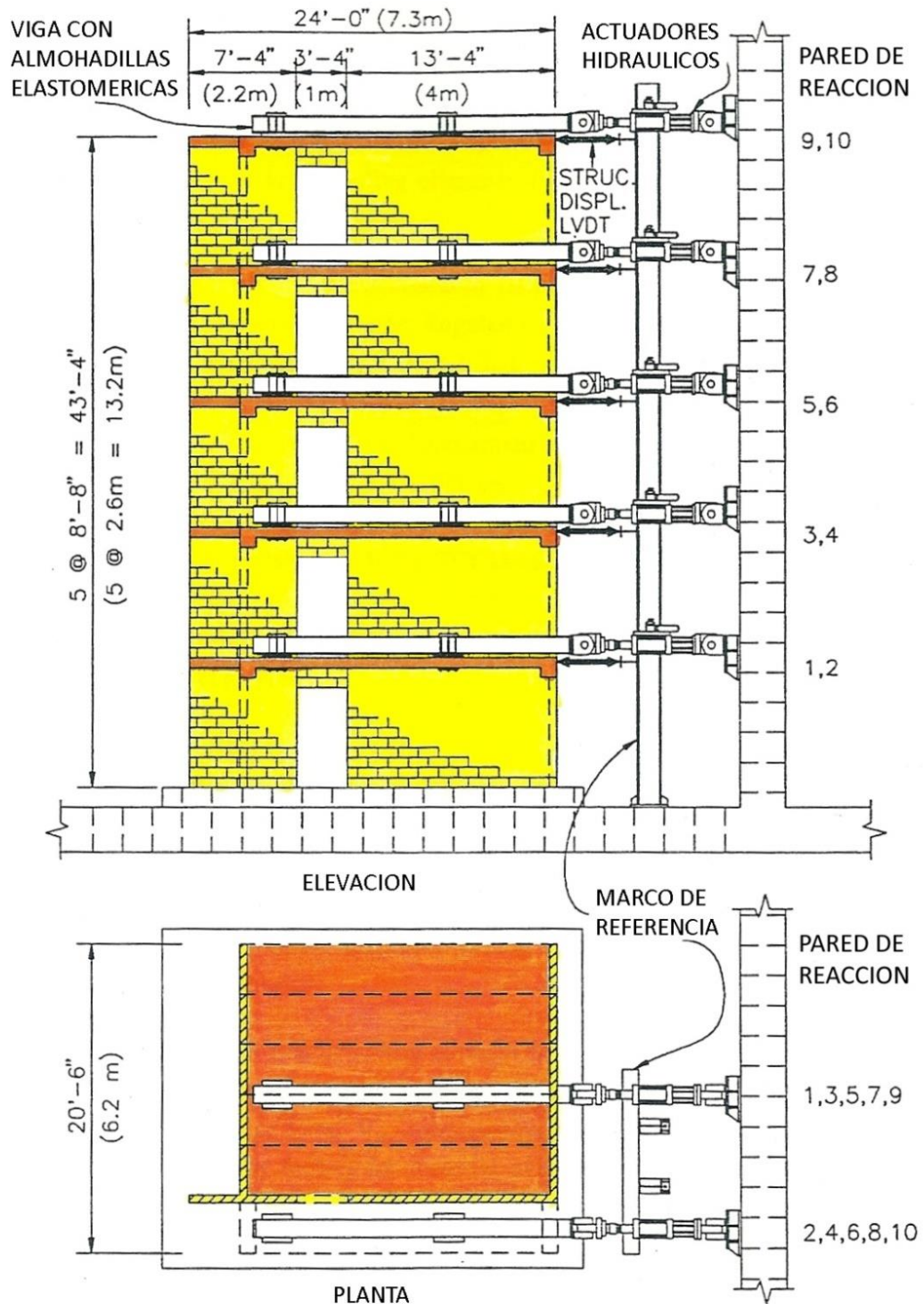


Figura 3. Pared de reacción y distribución de los actuadores hidráulicos sobre la cara norte del edificio. Figura modificada de Seible et al., (1994). Los números a lo largo de la pared de reacción se refieren al número del actuador hidráulico correspondiente.

El edificio surgió bajo la iniciativa del “*United States – Technical Coordinating Committee for Masonry Research*” (U.S.-TCCMAR), con el objetivo diseñar edificios de bloque de concreto en zonas sísmicas, considerando que, ante la más severa solicitud sísmica de diseño, una estructura de bloque de concreto deberá:

1. Soportar un desplazamiento de al menos cuatro veces el máximo esperado sin presentar degradación de la rigidez.
2. Disipar la energía sísmica en sus modos principales de respuesta mediante el amortiguamiento causado por sus componentes estructurales dúctiles.
3. Inhibir las fracturas causadas por los esfuerzos cortantes asociados a los modos normales del edificio.

El edificio, de bloque de concreto reforzado, proveyó una plataforma experimental única para investigar la respuesta sísmica estructural de un edificio en el límite de su estado lineal.

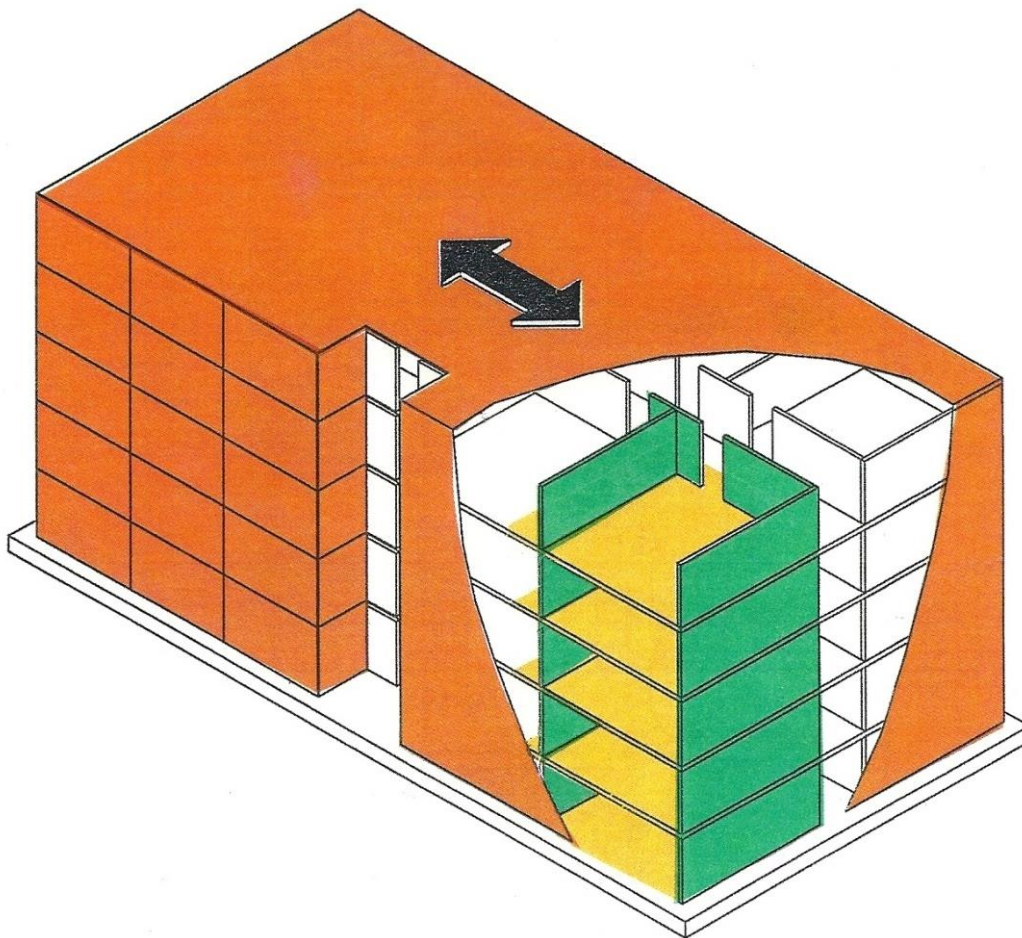


Figura 4. Edificio como parte de una estructura simétrica típica para unas oficinas de bloque de concreto o un edificio con departamentos. Las flechas en el techo del edificio indican la dirección de la carga sísmica simulada para dañar al edificio con los actuadores hidráulicos. Figura tomada de Seible et al., (1994).

Las paredes en las direcciones de tensión y compresión con respecto a las cargas de los actuadores hidráulicos tienen características diferentes de resistencia y de rigidez debido a diferencias en la distribución

del acero. El entramado del acero es más denso en la pared que responde a la compresión (cara Este). La estructura de estas paredes se ilustra esquemáticamente en la Figura 5.

ISSN-e 2395-8251

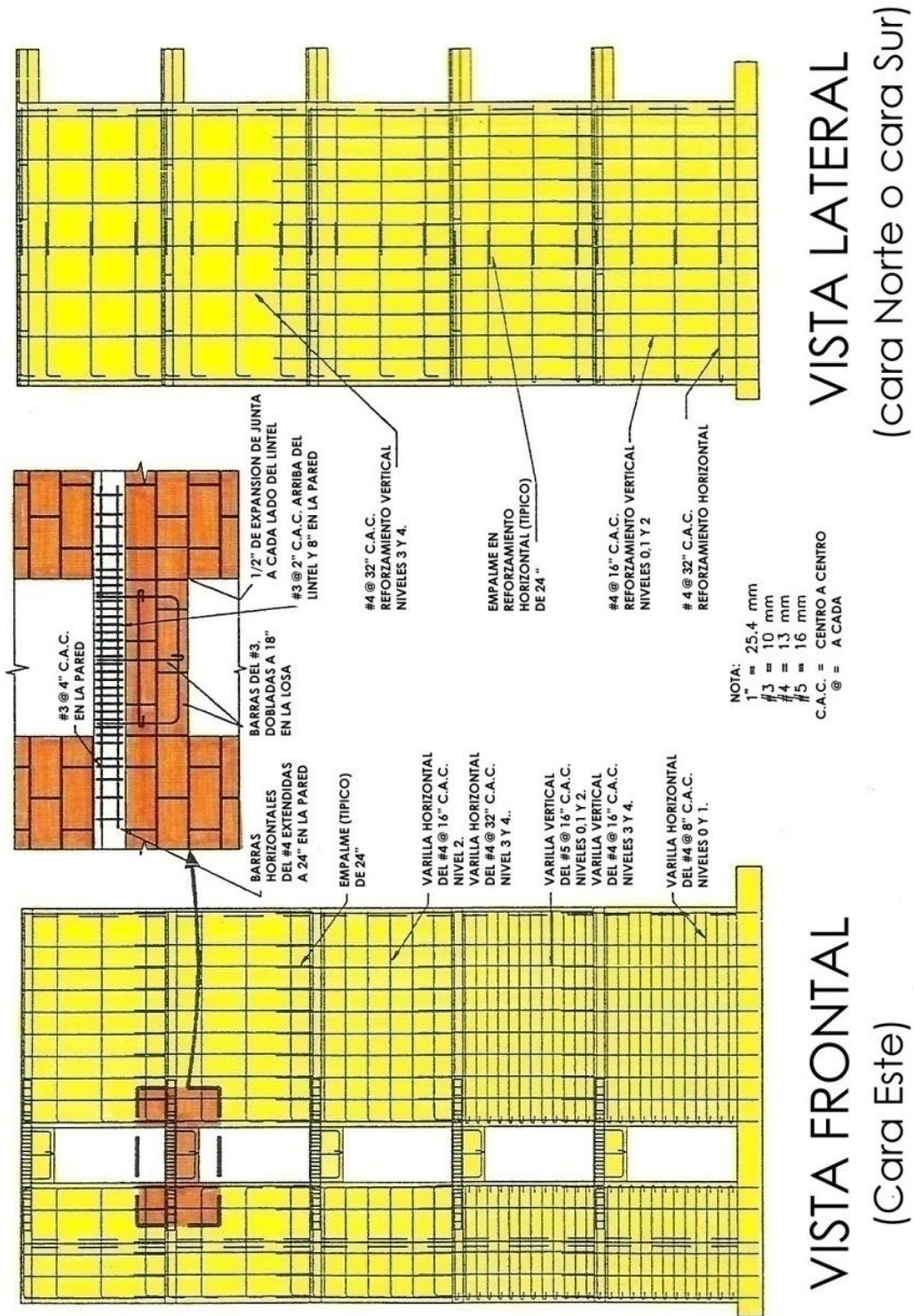


Figura 5. Reforzamiento estructural de las paredes del edificio. Figura modificada de Seible et al., (1994).

Los estándares de diseño que se utilizaron para el edificio corresponden a los indicados por “*National Earthquake Hazards Reduction Program Part I and II* (NEHRP); FEMA, 1988a,b. Estos estándares de diseño constituyen los códigos más completos de diseño que la U.S.-TCCMAR requería en el año 1992 para el diseño del edificio.

En todas las paredes del edificio se utilizó bloque de concreto tipo viga “Bond Beam” de 6×8×16 pulgadas o 150×200×400 mm, de una sola abertura, como se indica en la Figura 6.

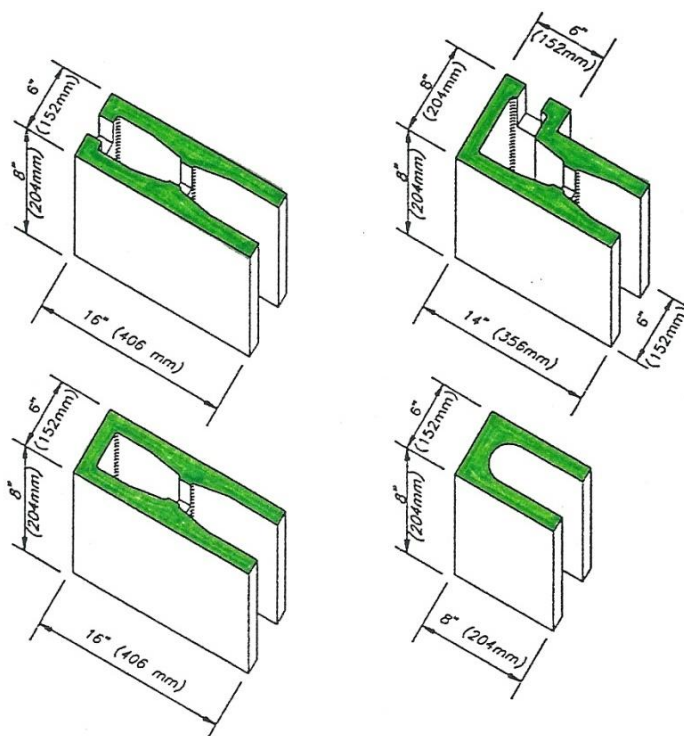


Figura 6. Unidades de bloque de concreto utilizadas en el edificio. Figura tomada de Seible et al., (1994).

Edificio con daño

Para dañar al edificio se simularon cargas sísmicas mediante un sistema de cargas laterales aplicadas con diez actuadores hidráulicos servo-controlados; un par de actuadores en cada nivel del edificio, como se indica en la Figura 3.

Los registros de aceleración de los sismos históricos que se utilizaron para programar el desplazamiento de los actuadores hidráulicos con los que se deformó secuencialmente al edificio hasta llegar al límite de su estado lineal, fueron: el terremoto de San Fernando de 1971 (Magnitud $M_w=6.6$), y el terremoto del Valle Imperial de 1979 ($M_w=6.8$). Se utilizaron seis segmentos de los registros de aceleración de los eventos mencionados, obtenidos en diferentes localidades, y se unieron para construir un sismograma sintético que prácticamente coincidiera con el espectro de diseño UBC (Uniform Building Code; 1991), en un intervalo de periodos de 0.2 a 0.6 s, que es el intervalo esperado de la respuesta fundamental del edificio.

Se introdujeron mayores cargas en los niveles inferiores, considerando que en estos niveles existe naturalmente una mayor concentración de las cargas. Las fuerzas laterales se distribuyeron a lo largo del área de la losa de cada nivel empleando una carga rígida mediante dos vigas ($W 18 \times 97$) en los niveles 1 a 5, conectadas a la losa por medio de almohadillas flexibles elastoméricas de 12.7 mm (1/2 in). Las dos vigas proveen una distribución de carga uniforme entre los dos puntos de carga de cada nivel. La transferencia de la fuerza entre la losa y las almohadillas elastoméricas se llevó a cabo por medio de una conexión por fricción proporcionada por cuatro barras exteriores de alta resistencia, las cuales sujetaban a la viga de carga y a la losa con una fuerza normal de aproximadamente 224 kN (50 kip) por almohadilla o por soporte. En la Figura 7 se muestra un ejemplo las fisuras en las paredes y losas del edificio resultantes de las cargas inducidas por los actuadores hidráulicos.

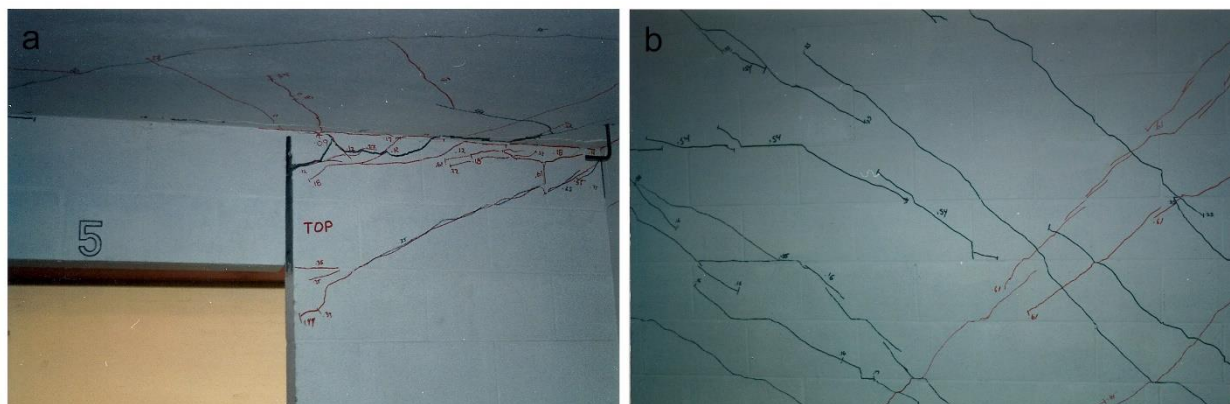


Figura 7. Grietas o fisuras en la losa de la azotea o nivel 5, y en la pared Este del nivel 2. En color negro se indican las grietas resultantes a la compresión y en rojo a la tensión. Fotografía: Luis H. Mendoza, 1992.

Edificio reparado

Con el objetivo de evaluar la efectividad de las técnicas para reparar estas estructuras y de adaptar nuevos métodos a los códigos existentes de construcción, se implementaron en el edificio nuevas técnicas de reparación para los edificios de bloque de concreto. Cabe mencionar que el edificio fue diseñado y construido para guiar el daño una vez que a éste se le aplicara una carga sísmica, reforzando la pared Este, que es en donde se encuentra la puerta de salida, y reforzando en menor grado las caras Norte y Sur, como se indica en la Figura 5. Este tipo de refuerzo incrementa la capacidad de deformación del edificio al facilitar la flexión y disminuir su demanda al corte.

Las técnicas utilizadas para reparar el edificio fueron:

- Utilización de concreto a base de polímeros (polymer-concrete) para parchar las zonas de concreto agrietadas más afectadas, como en la base de las paredes y en los dinteles de las puertas.
- Inyección de “resina epóxica” en las uniones agrietadas entre la losa de piso y la base de la pared.
- Reconstrucción y reforzamiento en la base de las uniones entre las paredes del nivel 0 del edificio.
- Reforzamiento de las losas de piso para soportar el esfuerzo al corte empleando diferentes métodos: espuma sintética, selladores y un mortero para estructuras “Silka Grout 212”.
- Reforzamiento de los dinteles.
- Capas de fibra de carbón en las paredes correspondientes a los dos primeros niveles para tapizar las paredes con daño crítico con el fin de reducir la deformación al corte y aumentar la rigidez en las paredes.

El reporte completo del edificio experimental en donde se describen los detalles estructurales, así como los daños controlados y las técnicas de reparación, se puede consultar en: “The U.S.-TCCMAR Full-Scale Five-Story Masonry Research Building Test”, en sus V tomos (e.g., Seible et al., 1994; Weeks et al., 1994).

INSTRUMENTACIÓN PARA EL REGISTRO DE VIBRACIONES DEL EDIFICIO

Los sismógrafos se instalaron en julio de 1992 en el edificio sin daño; en noviembre de 1992 en el edificio con daño, y en agosto de 1993 en el edificio reparado. Los datos de vibración se registraron con el sistema portátil Kinometrics SSR-1 (Solid State Recorder) empleando sensores de velocidad Mark L-4C (Figura 8). Los registros corresponden a las vibraciones en las direcciones Norte-Sur, Este-Oeste y vertical. Los instrumentos fueron proporcionados por el laboratorio de Sismología Aplicada a Ingeniería del CICESE.

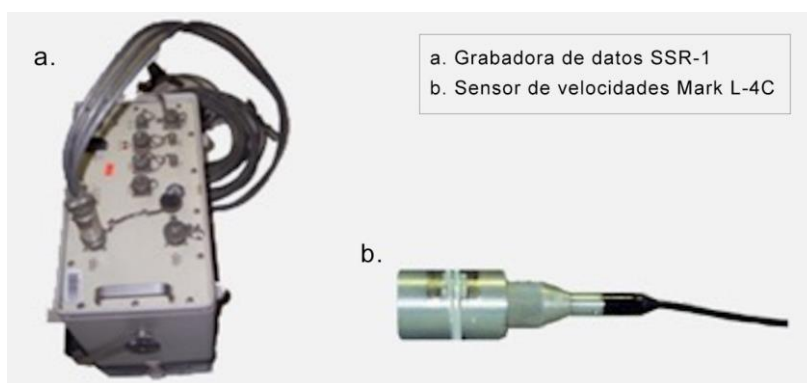


Figura 8. Equipos de instrumentación utilizados en el edificio

Se colocaron cuatro sensores de una componente horizontal en cada uno de los cinco niveles del edificio; dos en la dirección Norte-Sur y dos en la dirección Este-Oeste orientados a lo largo de las paredes. En la base o nivel cero del edificio, además de los sensores horizontales, se colocaron sensores verticales en cada una de las cuatro esquinas. La localización de los sensores se indica en la Figura 9. Esta misma localización de los sensores se empleó en el edificio con daño y reparado, tanto en las pruebas de vibración ambiental como forzada. Para las pruebas de vibración forzada se empleó una mesa vibratoria oscilando en la dirección Norte-Sur, colocada a 8 m en la esquina sureste del laboratorio Charles Lee Powell, como se indica en el Apéndice.

Adquisición de datos

Se obtuvieron 37 pruebas de vibración ambiental, 3 pruebas de vibración forzada y, casualmente, el registro de un sismo durante la primera etapa o edificio recién construido. El sismo de magnitud M_L 3.2, se localizó a 155 km del laboratorio Charles Lee Powell al sureste de Yucca Valley, California, ocurriendo a 2.2 km de profundidad a las 02:17:59 horas UTC, el 12 de julio de 1992 (catálogo de USGS). La Tabla 1 indica el cronograma de las observaciones de vibración. Por redundancia, se obtuvieron diferentes conjuntos de datos correspondientes a un mismo experimento.

El intervalo de muestreo en todos los registros de vibración ambiental y vibración forzada es de 0.01 s y la duración de cada uno de los registros es de 150 s (2.5 min).

Las frecuencias a las que se hizo oscilar la mesa vibratoria en todas las pruebas de vibración forzada se seleccionaron a partir de los resultados de las pruebas de vibración ambiental, observando las frecuencias en las que el edificio vibraba con mayor amplitud. En particular, fueron necesarias 62 pruebas, una prueba por cada frecuencia seleccionada, para completar un barrido en la vecindad de cada una de las frecuencias seleccionadas, en el intervalo de 1.9 Hz hasta 13.50 Hz.

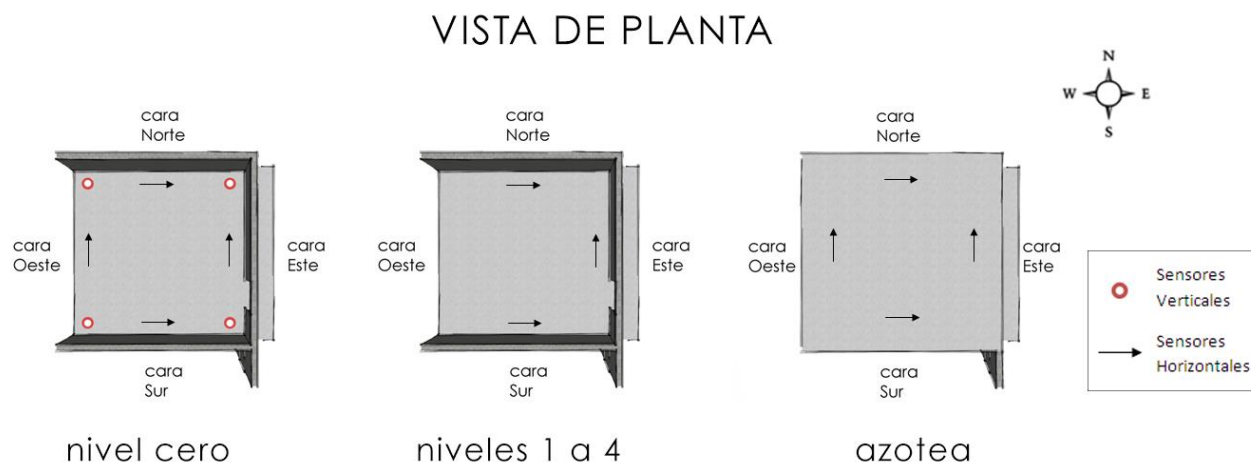


Figura 9. Localización de los sensores verticales y horizontales en el edificio experimental.

Tabla 1. Resumen y cronograma de las observaciones de vibración en el edificio.

Etapa del edificio	Fecha	Tipo de prueba	Nº de pruebas	Nº de canales horizontales	Nº de canales verticales	Nº total de canales
Sin daño	10/07/92	VA	6	20	4	24
	11/07/92	VF	1	20	4	24
	11/07/92	VA	2	20	4	24
	11/07/92	Sismo	1	20	4	24
Con daño	20/11/92	VA	7	18	--	18
	21/11/92	VA	5	18	--	18
	21/11/92	VA	5	14	4	18
	21/11/92	VF	1	18	--	18
	21/11/92	VF	1	14	4	18
Reparado	03/08/93	VA	6	18	3	21
	03/08/93	VA	6	17	4	21

Vibración Ambiental VA, vibración forzada VF.

Un día antes del inicio de los registros se obtuvieron observaciones simultáneas de vibración ambiental en el edificio, así como en la pared de reacción y en la azotea del laboratorio Charles Lee Powell para confirmar que las frecuencias características de la pared de reacción y de la azotea del laboratorio Charles Lee Powell no estuvieran afectando o coincidieran con las frecuencias características del edificio. Los resultados de esta etapa se describen en el Apéndice.

METODOLOGÍA

Identificación de frecuencias características y formas modales del edificio

Para observar las formas típicas de vibración del edificio o formas modales, se obtuvo la respuesta en frecuencia de cada una de las caras y niveles con respecto al Nivel 5 de la cara Norte. La respuesta en frecuencia entre dos niveles del edificio se define como (Bendat y Piersol, 1971):

$$Respuesta = \frac{\langle S_{xy}(f) \rangle}{\langle S_{xx}(f) \rangle} = \frac{\langle X^*(f)Y(f) \rangle}{\langle X^*(f)X(f) \rangle} = \frac{\langle |X||Y|e^{i(\theta_y - \theta_x)} \rangle}{\langle |X|^2 \rangle} = He^{i(\Delta)}. \quad (1)$$

En la ecuación (1), $X(f)$ y $Y(f)$ son las transformadas de Fourier de $x(t)$ e $y(t)$, respectivamente; el asterisco indica el complejo conjugado correspondiente. S_{xx} es el espectro de potencia o autoespectro del nivel 5 de la cara Norte, y S_{xy} es el espectro cruzado del nivel 5 de la cara Norte con cualquier otro nivel y cara del edificio. Los corchetes angulares indican el promedio ensamblado por banda de frecuencia de cada una de las estimaciones espectrales correspondientes a las diferentes muestras o segmentos en los que se subdividieron los registros $x(t)$ e $y(t)$.

La respuesta para cada frecuencia es un número complejo cuya magnitud o *admitancia* H indica el cociente espectral o amplitud relativa de cualquier otro punto del edificio con respecto al nivel 5 de la cara Norte. La fase de la respuesta es la diferencia de fase de cualquier otro punto del edificio con respecto a la fase del nivel 5 de la cara Norte.

Para cuantificar la constancia de la respuesta del edificio en cada una de las estimaciones espectrales, se calculó la coherencia, también conocida como coherencia cuadrada (Bendat y Piersol, 1971):

$$0 \leq Coherencia = \frac{\langle S^*_{xy}(f) \rangle \langle S_{xy}(f) \rangle}{\langle S_{xx}(f) \rangle \langle S_{yy}(f) \rangle} \leq 1. \quad (2)$$

La coherencia depende de la estabilidad de los cocientes espectrales en los diferentes segmentos o particiones espectrales. La coherencia por banda de frecuencia alcanza su máximo valor si tanto las diferencias de fase como los cocientes de amplitud se mantienen constantes en los diferentes segmentos. En cambio, la coherencia disminuye conforme aumenta la variación, tanto de las diferencias de fase como de los cocientes de amplitud en los diferentes segmentos.

Las principales formas modales que se espera identificar son un primer modo horizontal traslacional o modo fundamental y un modo torsional, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 10.

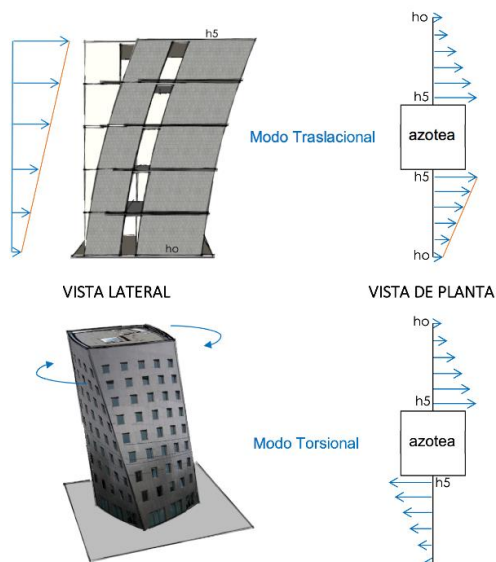


Figura 10. Vista en fachada y vista esquemática del primer modo horizontal traslacional y primer modo torsional de un edificio. Los vectores indican la magnitud de la Admitancia modulada por su fase correspondiente, $Real(He^{i(\Delta)})$, con la finalidad de describir la forma modal.

RESULTADOS

Frecuencias características del edificio sin daño

En los espectros resultantes de las diferentes pruebas de vibración (Figura 11), se identifican tres frecuencias características: una de 4.43 Hz, que es común en todas las pruebas (ambiental, forzada y sismo), en las cuatro caras del edificio; otra de 6.79 Hz en las caras norte y sur que sólo se observa en las pruebas de vibración ambiental, y otra de 8.01 Hz, en las caras norte y sur que se observa tanto en las pruebas de vibración ambiental como forzada.

El hecho de que el pico espectral de 6.79 Hz en las pruebas de vibración ambiental se observa únicamente en las caras norte y sur indica la posibilidad de una forma modal del edificio en la dirección Este-Oeste. En el espectro de vibración forzada no se observa un pico espectral pronunciado en 6.79 Hz, debido a que las vibraciones forzadas se generaron con una mesa vibratoria localizada al Sur del edificio, lo que explicaría que estas vibraciones no activaran un modo en la dirección Este-Oeste. Tampoco se observa este pico espectral en el registro del sismo. El pico espectral en la frecuencia de 8 Hz que se observa únicamente en las caras norte y sur, aunque de muy poca amplitud en comparación con la amplitud en la frecuencia de 6.79 Hz, indica la posibilidad de un segundo modo en la dirección Este-Oeste.

Formas modales del edificio sin daño

Las formas modales correspondientes a las frecuencias características de 4.43 Hz, 6.79 Hz y 8.01 Hz, se calcularon con los espectros de respuesta obtenidos de las pruebas de vibración ambiental y de vibración forzada.

Los espectros para la frecuencia de 4.43 Hz (Figura 12), muestran cualitativamente dos formas modales: un primer modo traslacional en la dirección Norte-Sur y un modo torsional. Note que los valores de admitancia, coherencia y fase en h5N son siempre (1,1,0), para indicar de manera redundante que todos los espectros cruzados se hicieron con respecto al nivel 5 de la cara Norte.

En la frecuencia de 6.79 Hz (Figura 13), se observa un primer modo traslacional en la dirección Este-Oeste, y en la frecuencia de 8.01 Hz se corrobora la existencia un modo compuesto por torsión y traslación en la dirección Este-Oeste (Figura 14).

La alta coherencia (> 0.9) en los espectros de respuesta de vibración forzada y de vibración ambiental, correspondientes a las frecuencias características de 4.43 Hz, 6.79 Hz y 8.01 Hz, indica la persistencia en las formas modales del edificio. Note que en todas las pruebas de vibración ambiental, la coherencia es comparativamente baja en el nivel cero en todas las caras del edificio. Esto se debe a la naturaleza aleatoria de la vibración ambiental que fuerza al edificio en su base. Mientras que la alta coherencia (0.99) en las pruebas de vibración forzada, en todos los niveles del edificio, incluyendo al nivel cero en todas las caras, se debe a la naturaleza monocromática de la vibración forzada.

Como se puede apreciar en las Figuras 11 a 14, las frecuencias características y las formas modales correspondientes, obtenidas mediante el análisis de vibración ambiental y vibración forzada, son prácticamente iguales y describen adecuadamente las formas modales del edificio. Sin embargo, por motivos de simplicidad, en adelante se presenta únicamente el análisis de los registros de vibración ambiental.

Cambios en las frecuencias características y en las formas modales

Los métodos utilizados para la detección del daño con las pruebas de vibración ambiental se basan en observar algún cambio en el comportamiento dinámico de la estructura. En general, el daño en un edificio está asociado con la degradación de la rigidez que a su vez se identifica con una disminución en la frecuencia de sus modos normales o en su caso con un aumento en la frecuencia cuando se repara o refuerza al edificio. En este caso, en los resultados (Figura 15), se observan cambios en las frecuencias características del edificio con daño y reparado con respecto al edificio sin daño.

El primer modo traslacional en la dirección Norte-Sur, frecuencia de 4.43 Hz, disminuye a 2.07 Hz después de que el edificio fue dañado, y aumenta a 3.30 Hz una vez que el edificio fue reparado o reforzado. Este mismo comportamiento sucede con el modo traslacional en la dirección Este-Oeste en la frecuencia de 6.79 Hz, cuya frecuencia disminuye a 5.0 Hz en el edificio con daño y aumenta a 6.13 Hz en el edificio reparado. El modo de mayor frecuencia (8.01 Hz) en el edificio sin daño corresponde a un modo traslacional de baja amplitud en la dirección Este-Oeste. Este modo no se aprecia en el edificio con daño y en cambio se aprecia un modo torsional en la frecuencia de 6.88 Hz; y un modo torsional de mayor frecuencia (9.05 Hz) en el edificio reparado.

Con la finalidad de identificar los niveles del edificio en donde se presenta el mayor daño se hace énfasis en observar la forma modal en la frecuencia de 4.43 Hz en la cara Este del edificio sin daño (Figura 16), para contrastarla con la forma modal correspondiente del edificio con daño, en donde se aprecia cómo se amplifica la amplitud relativa en los niveles h3, h4 y h5, y cómo se presenta un “nodo” en el nivel h2 de la cara Este, nivel en donde la coherencia disminuye de 0.96 en el edificio sin daño a 0.5 en el edificio con daño. En la misma Figura se hace notar cómo los mayores daños infringidos al edificio por tensión y compresión se registraron entre los niveles h0, h1 y h2, en la cara Este, debido a que la pared de reacción de los actuadores hidráulicos se localiza paralela a la cara Norte del edificio. Una vez reparado el edificio experimental, se aprecia cómo se recupera la forma del primer modo traslacional Norte-Sur en la cara Este, sin embargo, su frecuencia correspondiente se recupera solamente hasta los 3.3 Hz, lo que indica que se ha recuperado la rigidez, pero no en su totalidad. De hecho, Seible et al., (1994), indica que se logró una recuperación del 50% de la rigidez original.

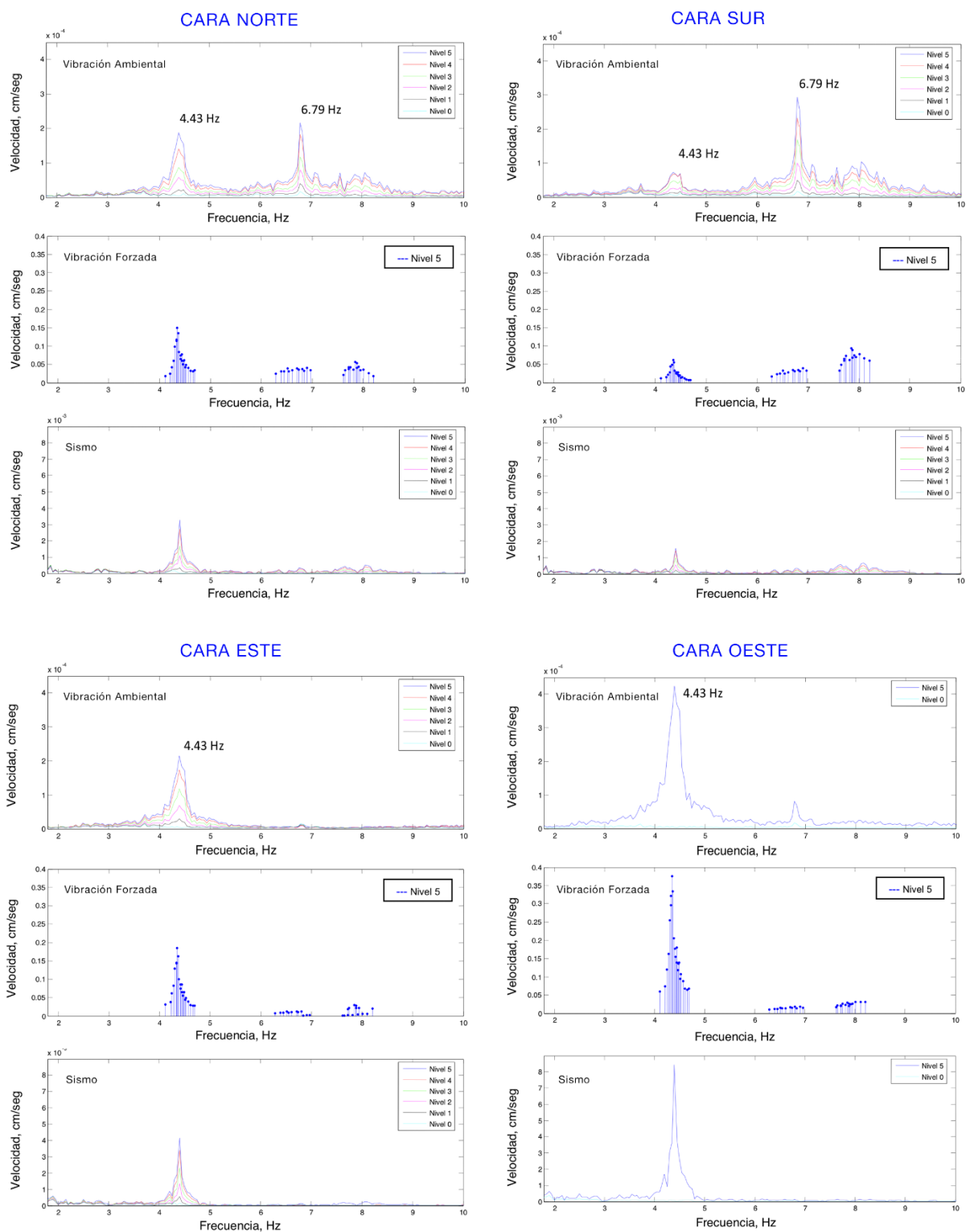


Figura 11. Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad en los diferentes niveles de las cuatro caras del edificio sin daño obtenidos a partir de vibración ambiental, vibración forzada, y sismo. Cara

Norte y cara Sur (componente horizontal en la dirección E-O). Cara Este y cara Oeste (componente horizontal en la dirección N-S).

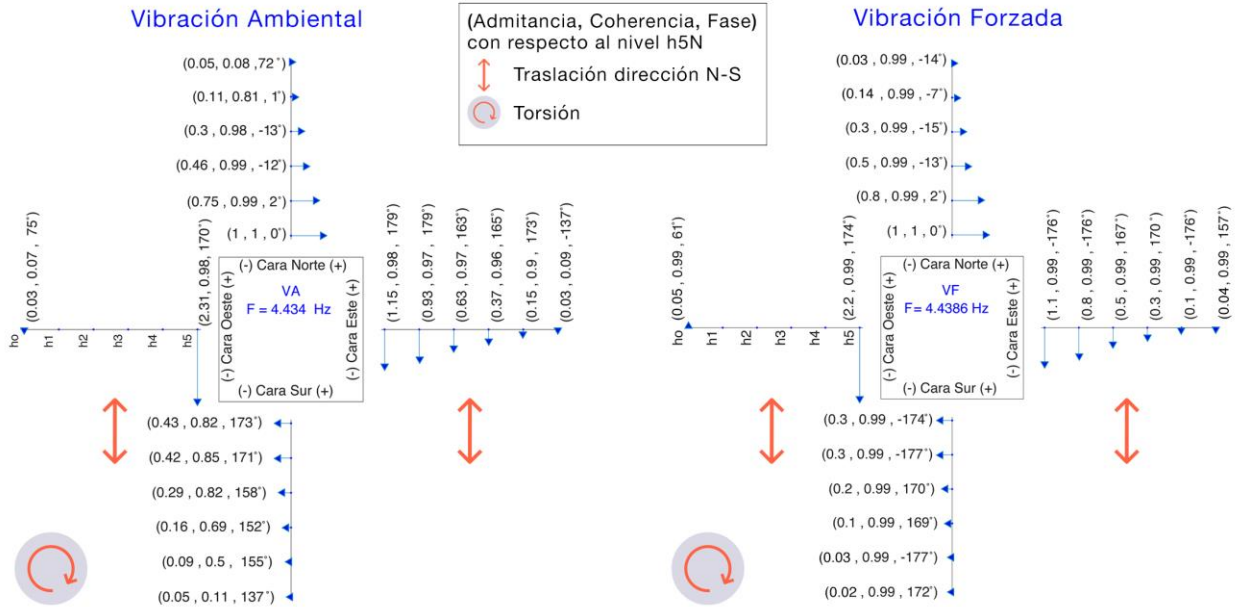


Figura 12. Respuesta del edificio sin daño para la componente espectral de vibración ambiental (VA; panel izquierdo) y de vibración forzada (VF; panel derecho) a 4.43 Hz.

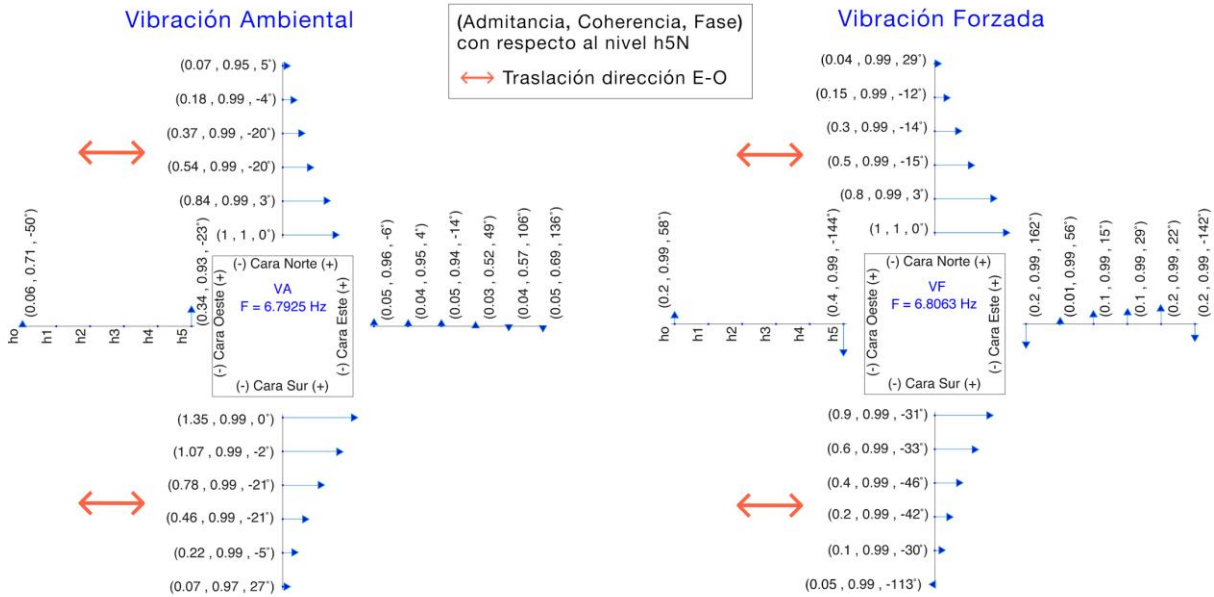


Figura 13. Respuesta del edificio sin daño para la componente espectral de vibración ambiental (panel izquierdo) a 6.79 Hz y de vibración forzada (panel derecho) a 6.80 Hz.

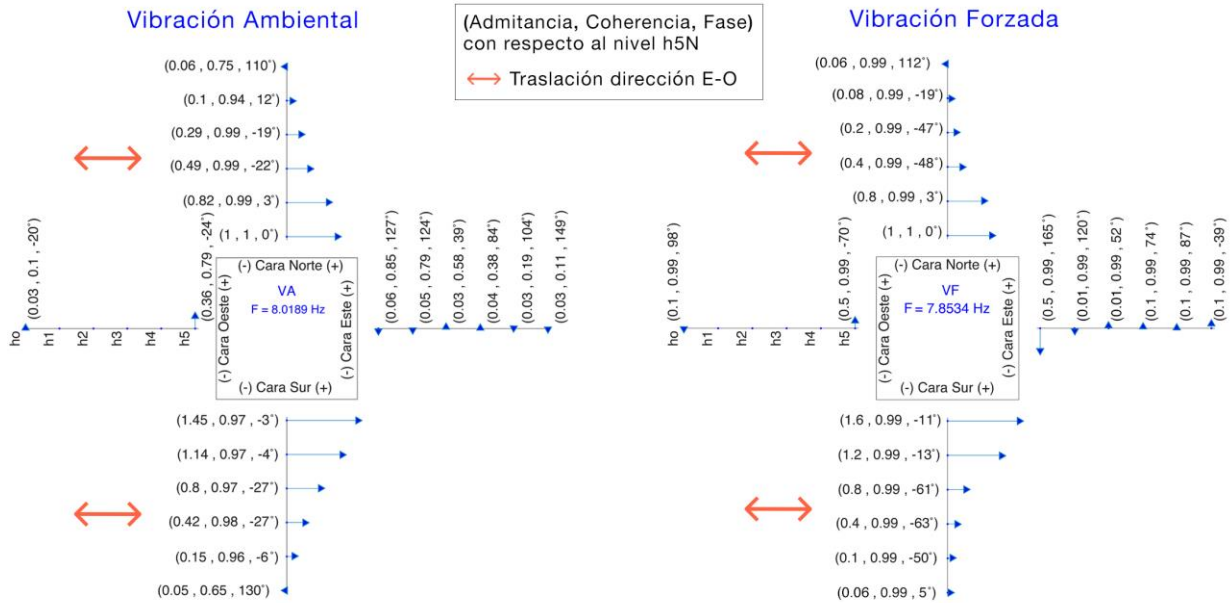


Figura 14. Respuesta del edificio sin daño para la componente espectral de vibración ambiental (panel izquierdo) a 8.01 Hz; y de vibración forzada (panel derecho) a 7.85 Hz.

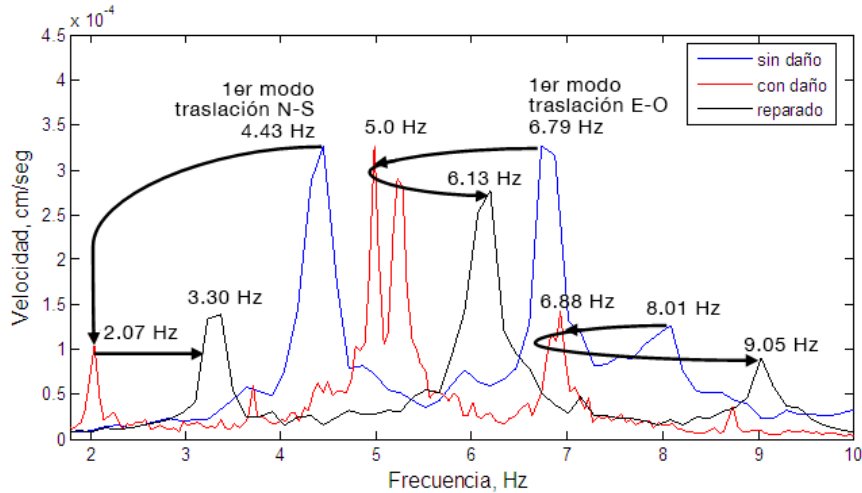


Figura 15. Espectros de amplitud de las observaciones de vibración ambiental del nivel 5 de la cara norte del edificio en sus tres etapas: sin daño, con daño y reparado, respectivamente. Las flechas indican el cambio en la frecuencia de cada uno de los modos normales del edificio.

En la dirección Este-Oeste no se observan cambios significativos en la forma modal en las tres etapas del experimento (Figura 17). Solamente se observan los cambios en su frecuencia consistentes con la degradación y recuperación de su rigidez.

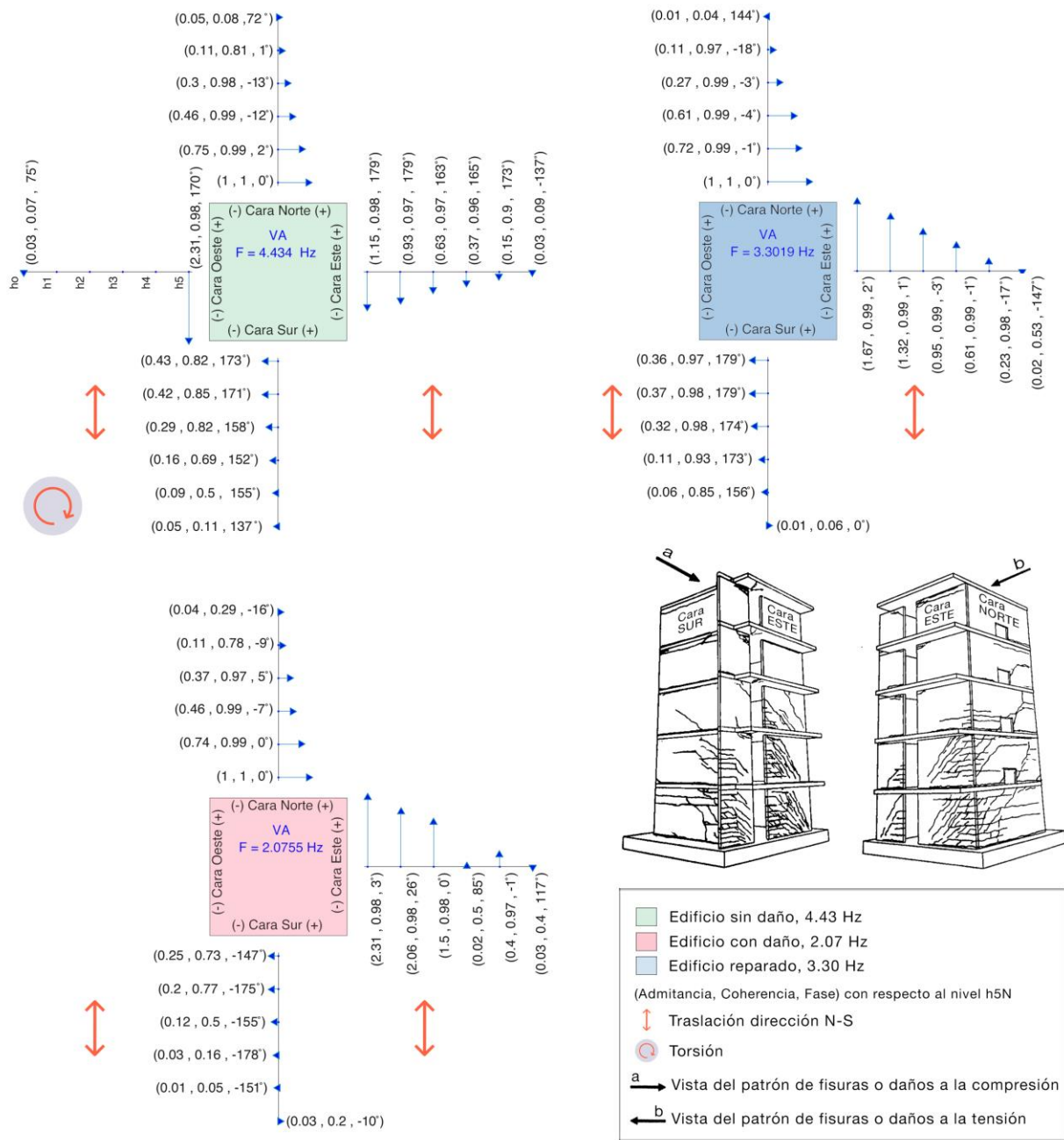


Figura 16. Primer modo traslacional en la dirección Norte-Sur en el edificio sin daño (4.43 Hz), con daño (2.07 Hz) y reparado (3.30 Hz), para la componente espectral de vibración ambiental. El esquema del edificio muestra el patrón de fisuras o daños debido a los actuadores hidráulicos (Seible et al., 1994).

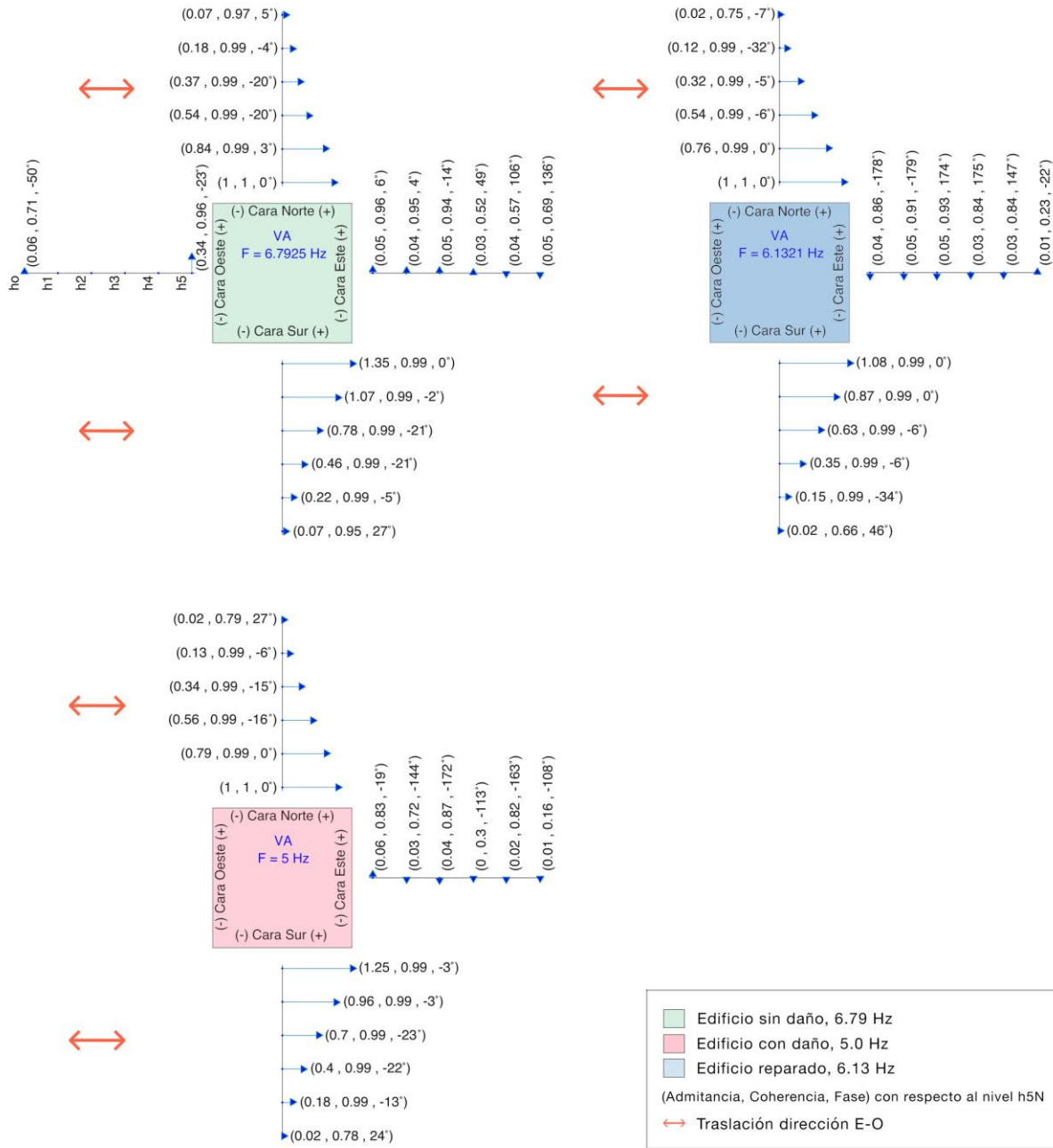


Figura 17. Primer modo traslacional en la dirección Este-Oeste en el edificio sin daño (6.79 Hz), con daño (5.0 Hz) y reparado (6.13 Hz), para la componente espectral de vibración ambiental.

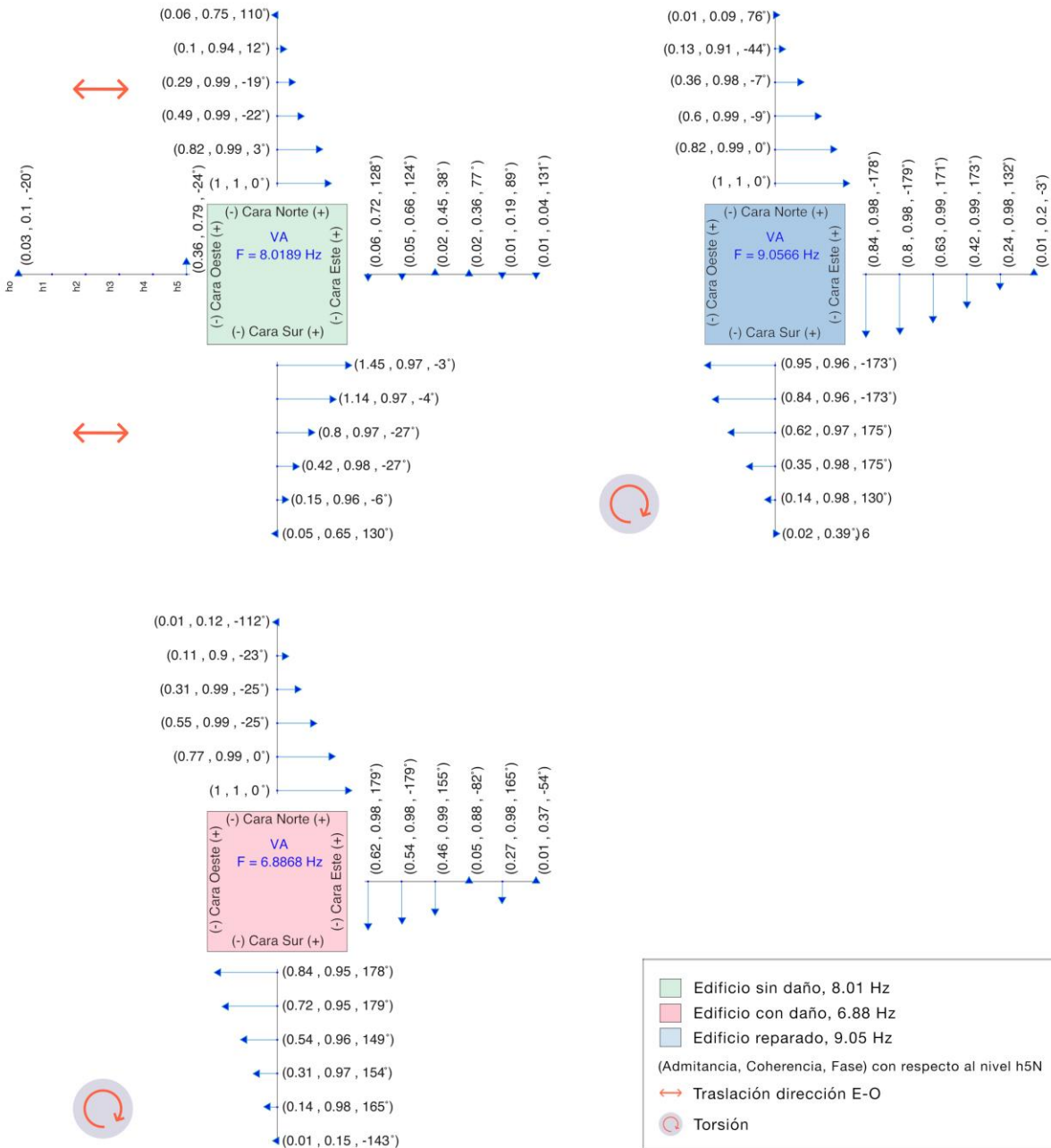


Figura 18. Respuesta del edificio sin daño (8.01 Hz), con daño (6.88 Hz) y reparado (9.05 Hz), para la componente espectral de vibración ambiental.

En las formas modales de mayor frecuencia (Figura 18), se aprecia cómo el modo traslacional Este-Oeste (8 Hz) cambia a un modo torsional dominante (6.88 Hz) una vez que el edificio ha sido dañado. Sin embargo, mientras que la torsión se observa nítidamente en todos los niveles de las caras Norte y Sur y en los niveles h5, h4 y h3 de la cara Este, se observa un “nodo” en el nivel h2 de la cara Este, al igual que el “nodo” que se observa en el primer modo traslacional en la frecuencia de 2.07 Hz en el edificio con daño. Note que en el nodo que se observa en el nivel h2 de la cara Este, coincide en su localización con los daños

observados en las paredes correspondientes a los niveles h0, h1 y h2, de la cara Este, que es la cara en donde se registraron los mayores daños debido a los actuadores hidráulicos.

El cambio en la frecuencia de la forma modal, de 6.88 Hz a 9.05 Hz, una vez que el edificio ha sido reparado, pudiera estar indicando que este modo no corresponde a los anteriores debido a que supera la frecuencia de 8.01 Hz observada en la primera etapa del edificio, como si la rigidez hubiese aumentado después de las reparaciones.

CONCLUSIONES

Los registros de vibración ambiental, al igual que los registros de vibración forzada, resultaron adecuados para analizar las propiedades dinámicas del edificio experimental, siendo más rápido y menos costoso obtener y analizar registros de vibración ambiental que de vibración forzada. En este trabajo en particular, se tuvo la oportunidad de experimentar con ambos tipos de registros, lo que permitió verificar una vez más que los registros de vibración ambiental son aceptablemente suficientes para identificar tanto las frecuencias características de un edificio como sus formas modales. Además, en este trabajo se obtuvo el registro de un sismo durante la primera etapa del edificio experimental (recién construido), cuyo análisis permitió confirmar las frecuencias características obtenidas mediante los análisis tanto de vibración ambiental como de vibración forzada.

Los cambios observados en las frecuencias de los modos normales del edificio en sus tres etapas (sin daño, con daño y reparado), confirman la hipótesis de que el daño en un edificio está asociado con la degradación de la rigidez que a su vez se identifica con una disminución en la frecuencia de sus modos normales o en su caso con un aumento en la frecuencia cuando se repara o refuerza al edificio. A la par, los cambios observados en las formas modales del edificio una vez dañado, permiten identificar cualitativamente las caras y los niveles en donde ha ocurrido el daño.

El monitoreo sistemático de las vibraciones de un edificio permitiría determinar su integridad estructural al verificar la constancia en sus frecuencias características y formas modales, o en su defecto, permitiría observar cambios en su rigidez, ya sea por causas naturales como una solicitud sísmica, cambios en las propiedades del suelo o simplemente quizá por tiempo de vida.

AGRADECIMIENTOS

Laura G. Ortiz-Huerta agradece al CONACYT el apoyo otorgado a través de la beca para estudios de maestría Núm. 24765. Los autores agradecen al Dr. J. Enrique Luco por su invitación a participar en la instrumentación y registro sísmico del edificio experimental y por su guía en el análisis de los registros sísmicos en las diferentes etapas. Sus comentarios fueron fundamentales para el resultado final de esta investigación. Nuestro agradecimiento a los revisores anónimos cuyas correcciones enriquecieron sustancialmente el contenido de este artículo.

APÉNDICE

Análisis del edificio, de la pared de reacción y de la azotea del laboratorio Charles Lee Powell

El objetivo de esta prueba fue identificar las frecuencias características del edificio, de la pared de reacción y del laboratorio Charles Lee Powell, con la finalidad de verificar que las vibraciones de las

estructuras no entran en resonancia con el edificio experimental. En este caso solo se utilizaron las observaciones de vibración ambiental. Estos registros se realizaron un día antes del inicio de pruebas de vibración ambiental.

Ubicación de sensores

Por el tipo de instrumentos y la cantidad de cableado que se necesitaba para poder grabar las vibraciones de las tres estructuras al mismo tiempo, se colocaron cuatro sensores de una componente horizontal en el nivel 4 del edificio experimental orientados a lo largo de las paredes, dos sensores horizontales en la pared de reacción y tres sensores horizontales en la azotea del laboratorio Charles Lee Powell, como se indica en la Figura A.1.

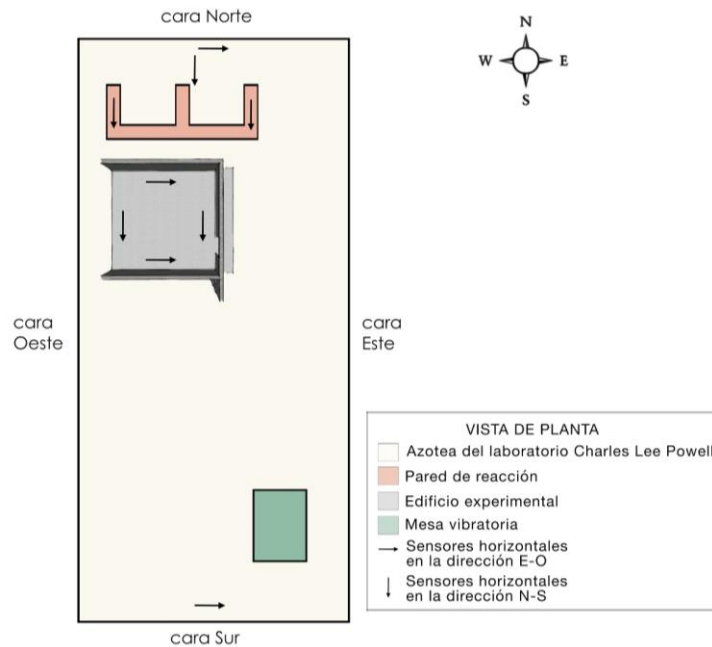


Figura A.1. Vista esquemática de planta de la ubicación de edificio experimental, de la pared de reacción y de la mesa vibratoria dentro del Laboratorio Charles Lee Powell, y localización de sensores horizontales para la prueba de vibración ambiental.

Identificación de frecuencias características

Los espectros resultantes de la vibración ambiental en las tres estructuras se muestran en la Figura A.2:

- En la azotea del laboratorio Charles Lee Powell, en los sensores paralelos a las caras norte y sur, observamos un pico prominente en la frecuencia de 2.2 Hz (Figura A.2a), mientras que en el sensor orientado en la dirección longitudinal no se observa un pico espectral prominente, lo que indica que el laboratorio oscila preferentemente en la dirección transversal (Este-Oeste).
- En los espectros del nivel 4 del edificio experimental (Figura A.2b), observamos un pico en la frecuencia de 4.5 Hz que se encuentra presente en las cuatro caras del edificio y es de mayor amplitud en las caras este y oeste, indicando una oscilación preferencial en la dirección Norte-Sur. También observamos energía en la banda de frecuencia entre 7 Hz y 8 Hz que solamente se observa

en las caras norte y sur, indicando oscilaciones preferenciales en la dirección Este-Oeste. Estos resultados concuerdan con los resultados de la Figura 13, en donde se identifican las frecuencias características del edificio sin daño.

- En la pared de reacción, al igual que en el edificio, encontramos energía en la banda de frecuencia entre 7 Hz y 8 Hz (Figura A.2c). Sin embargo, en contraste con el edificio, las oscilaciones son de menor amplitud y la pared de reacción oscila naturalmente en la dirección Norte-Sur, mientras que el edificio oscila preferencialmente en la dirección Este-Oeste. Cabe la posibilidad de que las oscilaciones en la pared de reacción sean oscilaciones forzadas por el edificio ya que, por su diseño, la frecuencia natural de oscilación de la pared de reacción es muy alta.

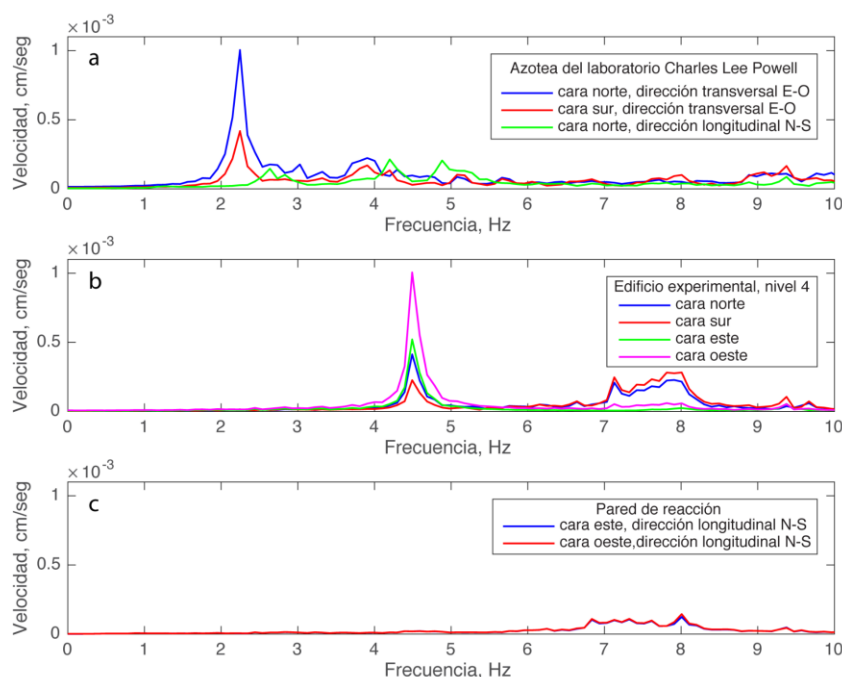


Figura A.2. Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad en: a. Azotea del laboratorio Charles Lee Powell. b. Edificio experimental. c. Pared de reacción obtenidos a partir de los registros de vibración ambiental.

REFERENCIAS

- Bendat, J.S., y Piersol, A.G. (1971), *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, 2nd edn, John Wiley and Sons Inc, New York. 407 p. ISBN 10: 047106470X.
- Casas-Guzik, N. (2019), “Ensayo de un edificio de mampostería confinada de 5 niveles a escala en mesa vibradora”, *Tesis de Maestría*, Universidad Nacional Autónoma de México, 257 p.
- Chakra-Varthy, P., y Basu, D. (2021). “Natural period and vertical distribution of base shear in confined masonry buildings using ambient vibration test”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(4), 1851-1899. [DOI: 0.1007/s10518-021-01046-8](https://doi.org/10.1007/s10518-021-01046-8).

- De-la-Colina, J., y Valdés-González, J. (2021). “Forced-vibration tests of a reinforced concrete four-story building structure”, *Journal of Structural Engineering*, 147(7), 04721004. DOI: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003011](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003011)
- FEMA Federal Emergency Management Agency, (1988a), “NEHRP Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings. Part I: Provisions”. *Earthquake Hazards Reduction Series 17*. Washington, D.C. FEMA 95.
- FEMA Federal Emergency Management Agency, (1988b), “NEHRP Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings. Part II: Commentary”. *Earthquake Hazards Reduction Series 18*. Washington, D.C. FEMA 96.
- Henao Ángel, D., Botero Palacio, J. C., y Muriá Vila, D. (2014). “Identificación de propiedades dinámicas de un modelo estructural sometido a vibración ambiental y vibración forzada empleando mesa vibradora”, *Ingeniería sísmica*, (91), 54-73. DOI: [10.18867/RIS.91.181](https://doi.org/10.18867/RIS.91.181).
- Inci, P., Goksu, C., Tore, E., y Ilki, A. (2021). “Effects of seismic damage and retrofitting on a full-scale substandard RC building-ambient vibration tests”, *Journal of Earthquake Engineering*, 1-28. DOI: [10.1080/13632469.2021.1887009](https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1887009).
- International Conference of Building Officials (1991), “Uniform Building Code”. *International Conference of Building Officials*. Whittier, California, U.S.A. 1050 p. ISSN: 0896-9655.
- Khanmohammadi, M., Eshraghi, M., Behboodi, S., Mobarake, A. A., y Nafisifard, M. (2021). Dynamic characteristics and target displacement of damaged and retrofitted residential buildings using ambient vibration tests following Sarpol-e Zahab (Iran) Earthquake (Mw 7.3)”, *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 1-28. DOI: [10.1080/13632469.2021.1911880](https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1911880)
- Motamedi, M., Ventura, C. E., Lara, O., y Barredo, J. H. (2021). “Ambient vibration tests and modal response analysis of Guayaquil metropolitan cathedral in Guayaquil, Ecuador”, en: Pakzad S. (eds) *Dynamics of Civil Structures, Volume 2. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. pp. 75-89. Springer, Cham. DOI: [10.1007/978-3-030-47634-2_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47634-2_9).
- Pepi, C., Cavalagli, N., Gusella, V., y Giofrè, M. (2021). “Damage detection via modal analysis of masonry structures using shaking table tests”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(8), 2077-2097. DOI: [10.1002/eqe.3431](https://doi.org/10.1002/eqe.3431).
- Seible F., Hegemier G.A., Priestley M.J.N., Kingsley G., Kürkchübasche A., Igarashi A., y Weeks J. (1994), “The U.S.-TCCMAR Full-scale five-story masonry research building test. Part I – Executive Summary. Report No. SSRP-94/01”. *Department of Applied Mechanics and Engineering Sciences*, University of California, San Diego. 71 pp.
- Souici, R., Ait-Meziane, Y., y Benouar, D. (2021). “Identification of vibration direction of existing buildings using ambient vibration noise tests”, *Arabian Journal of Geosciences*, 14(1), 1-12. DOI: [10.1007/s12517-020-06306-6](https://doi.org/10.1007/s12517-020-06306-6).
- Weeks J., Seible F., Hegemier G., y Priestley M.J.N. (1994). “The U.S.-TCCMAR Full-scale five-story masonry research building test. Part V – Repair and Retest. Report No. SSRP-94/05”. *Department of Applied Mechanics and Engineering Sciences*, University of California, San Diego. 115 pp.