

TESIS DEFENDIDA POR  
**LAURA GABRIELA ORTIZ HUERTA**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

M.C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo

*Director del Comité*

---

M.C. José Guadalupe Acosta Chang

*Miembro del Comité*

---

M.C. José Douglas Frez Cárdenas

*Miembro del Comité*

---

Dr. José Gómez Valdés

*Miembro del Comité*

---

Dr. Antonio González Fernández

*Coordinador del programa de posgrado  
en Ciencias de la Tierra*

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

*Director de Estudios de Posgrado*

10 de diciembre del 2010.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

---

**IDENTIFICACIÓN DE CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL  
DE UN EDIFICIO EXPERIMENTAL, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VIBRACIÓN  
AMBIENTAL Y VIBRACIÓN FORZADA, EMPLEANDO TÉCNICAS DE  
IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS**

**TESIS QUE PRESENTA**

**LAURA GABRIELA ORTIZ HUERTA**

**PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA  
OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Ensenada, Baja California, México. Diciembre del 2010.

**RESUMEN** de la tesis de **Laura Gabriela Ortiz Huerta**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA con orientación en SISMOLOGÍA. Ensenada, Baja California. Diciembre del 2010.

**IDENTIFICACIÓN DE CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO EXPERIMENTAL, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL Y VIBRACIÓN FORZADA, EMPLEANDO TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS**

Resumen aprobado por:

---

M.C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo

Director de Tesis

**RESUMEN**

En esta Tesis 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 con bloque de concreto reforzado dentro del Laboratorio Charles Lee Powell de la Universidad de California en San Diego (UCSD). 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 pérdida de rigidez en el edificio con daño y a la recuperación de la rigidez en el edificio reparado. El análisis de los cambios observados en la coherencia de la forma modal en la banda de frecuencia de 5-7 Hz, permite localizar los niveles más dañados del edificio y a su vez, permite estimar el porcentaje de recuperación de la rigidez del edificio reparado.

**Palabras Clave:** Edificio experimental, Laboratorio Charles Lee Powell, vibración ambiental, vibración forzada, formas modales.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **Laura Gabriela Ortiz Huerta** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in EARTH SCIENCES with orientation in SEISMOLOGY. Ensenada, Baja California, México. December 2010.

**IDENTIFICATION OF STRUCTURAL CHANGES IN THE BEHAVIOR OF AN  
EXPERIMENTAL BUILDING, BY THE ANALYSIS OF AMBIENT AND FORCED  
VIBRATION DATA, USING SYSTEM IDENTIFICATION TECHNIQUES**

**ABSTRACT**

In this Thesis we analyzed records of ambient vibration and forced vibration 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). The 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, 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. The analysis of the observed changes in the coherence of the modal form in the frequency band of 5-7 Hz, allows the localization of the most damaged floor-levels, and in turn, to estimate the percentage of recovery of the rigidity of the repaired building.

**Keywords:** Experimental building, Charles Lee Powell Laboratory, ambient vibration, forced vibration, modal forms.

## DEDICATORIA

*Con todo mi cariño a mis papás*

*Laura Huerta Tamayo y Modesto Ortiz Figueroa*

## AGRADECIMIENTOS

A mi director de Tesis, Luis Mendoza, por sus enseñanzas y paciencia durante las eternas y fructíferas discusiones en cada uno de los temas de la Tesis. Gracias por su confianza y amistad.

A mis sinodales: José Guadalupe Acosta Chang, José Douglas Frez Cárdenas y José Gómez Valdés, por su atención e importantes contribuciones en los avances y en la revisión de la Tesis.

Al Dr. Enrique Luco profesor de la Universidad de California San Diego, por su valiosa colaboración en este trabajo, sus sugerencias y comentarios fueron fundamentales para el resultado final de esta investigación.

A mis hermanos Ernesto y Felipe por compartir conmigo sus experiencias en programación y en el análisis de datos.

A Jose, que a pesar de los viajes y la distancia me has apoyado y acompañado con cariño en esta travesía.

A todos mis profesores, compañeros y amigos por su apoyo, gran cariño e invaluable amistad.

Gracias a todos por haber compartido esta etapa de mi vida que hoy culmina con este trabajo.

Esta Tesis se realizó con el apoyo de una beca de maestría del CONACYT. También agradezco al Departamento de Sismología y a la División de Ciencias de la Tierra del CICESE por la extensión de beca para culminar la escritura de esta Tesis.

## CONTENIDO

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Generales.....	3
1.1.2. Particulares .....	4
1.2. Descripción de la estructura.....	5
1.2.1. Edificio recién construido.....	5
1.2.2. Edificio con daño .....	12
1.2.3. Edificio reparado.....	15
1.3. Técnicas de Identificación de Sistemas (TIS) .....	20
1.1.1. Instrumentación de la estructura o edificio-prueba .....	22
1.1.2. Adquisición de datos .....	25
 <b>2. Metodología .....</b>	 <b>28</b>
2.1. Control de calidad de los datos.....	28
2.2. Identificación de frecuencias características y formas modales del edificio-prueba empleando la Transformada de Fourier.....	29
2.3. Identificación de frecuencias características y formas modales empleando la Descomposición en Valores Singulares (DVS) .....	36
 <b>3. Análisis del edificio-prueba sin daño .....</b>	 <b>38</b>
3.1. Identificación de las frecuencias características .....	38
3.2. Identificación de formas modales del edificio-prueba sin daño.....	43
3.2.1. Respuesta en el dominio de la frecuencia.....	43
3.2.2. Descomposición en Valores Singulares (DVS) en el edificio-prueba sin daño.....	50
3.3. Separación de la torsión de la traslación en el edificio-prueba sin daño..	54
3.4. Modos verticales de la base del edificio-prueba sin daño.....	57
3.4.1. Balanceo (rocking).....	57
3.4.2. Pandeo o torsión de la base (warping).....	60

## **CONTENIDO (continuación)**

<b>4. Análisis del edificio-prueba con daño .....</b>	<b>62</b>
4.1. Identificación de las frecuencias características .....	62
4.2. Formas modales del edificio-prueba con daño .....	67
4.2.1. Respuesta en el dominio de la frecuencia.....	67
4.2.2. Descomposición en Valores Singulares (DVS) en el edificio-prueba con daño.....	74
4.3. Separación de la torsión de la traslación en el edificio-prueba con daño.	79
4.4. Modos verticales de la base del edificio-prueba con daño.....	81
4.4.1. Balanceo (rocking).....	81
4.4.2. Pandeo en la base (warping).....	84
<b>5. Análisis del edificio-prueba reparado .....</b>	<b>85</b>
5.1. Identificación de frecuencias características.....	85
5.2. Identificación de formas modales del edificio-prueba reparado .....	87
5.2.1. Respuesta en el dominio de la frecuencia.....	87
5.3. Separación de la torsión de la traslación en el edificio-prueba reparado.	91
<b>6. Discusión de resultados .....</b>	<b>93</b>
6.1. Cambio en frecuencias características y formas modales .....	93
6.2. Cambios en la coherencia y en la variancia de la fase .....	94
<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>102</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>103</b>
<b>Apéndice A.....</b>	<b>105</b>
<b>Apéndice B.....</b>	<b>109</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fachada frontal y dimensiones del edificio-prueba. ....	5
Figura 2. Vistas frontal y laterales del edificio-prueba. ....	6
Figura 3. <i>Pared de Reacción</i> y distribución de los actuadores hidráulicos sobre la cara norte del edificio-prueba. Figura modificada de Seible <i>et al.</i> (1994). ....	7
Figura 4. Edificio-prueba 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. Figura tomada de Seible <i>et al.</i> (1994). ....	9
Figura 5. Reforzamiento estructural de las paredes del edificio-prueba. Figura modificada de Seible <i>et al.</i> (1994). ....	10
Figura 6. Unidades de bloque de concreto utilizadas en el edificio-prueba. Figura tomada de Seible <i>et al.</i> (1994). ....	11
Figura 7. Conexión de la carga rígida a la losa. <b>a.</b> viga W 18 x 97. <b>b.</b> Barras exteriores de alta resistencia. Fotografía tomada de Seible <i>et al.</i> (1994). ....	14
Figura 8. Vista de planta. Detalles de reparación de la pared y losa de piso. Figura modificada de Seible <i>et al.</i> (1994). ....	17
Figura 9. Vista de elevación. Capas de fibra de carbón. Figura modificada de Seible <i>et al.</i> (1994). ....	18
Figura 10. Nivel 0: Pared larga localizada en la cara este del edificio-prueba. <b>a.</b> pared con daño después de la simulación sísmica. <b>b.</b> Pared reparada con capas de fibra de carbón. Fotografía tomada de Seible <i>et al.</i> (1994). ....	19

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura 11. Vista en fachada y vista esquemática del primer modo horizontal traslacional y primer modo torsional de un edificio.....	20
Figura 12. Tipos de movimientos verticales que se esperan en la base de un edificio.....	21
Figura 13. De izquierda a derecha: grabadora de datos SSR-1 y sensor de velocidades Mark L-4C. ....	22
Figura 14a. Vista de planta del nivel cero del edificio prueba con la localización de los sensores verticales y horizontales.....	23
Figura 14b. Vista de planta de los niveles 1 a 4 del edificio prueba con la localización de los sensores horizontales. ....	24
Figura 14c. Vista de planta de la azotea o nivel 5 del edificio prueba con la localización de los sensores horizontales. ....	24
Figura 15. Componente Este-Oeste de la cara Norte en sus 5 niveles. Prueba A, desechada. Los niveles 2 y 3 dejan de grabar a los 15 segundos. Prueba B, grabada correctamente. ....	28
Figura 16. Caso I: Coherencia en función de la desviación estándar de las diferencias de fase entre los diferentes segmentos, manteniendo constantes los cocientes de amplitud. ....	32
Figura 17. Caso II: Coherencia en función de los porcentajes de variación o nivel de ruido de la amplitud, manteniendo constantes las diferencias de fase entre los diferentes segmentos.....	32

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

- Figura 18. Caso III: Coherencia en función de la desviación estándar de las amplitudes y de las diferencias de fase. .... 33
- Figura 19. Vista de planta de la azotea del edificio-prueba. La respuesta para la frecuencia de 0.97 Hz, se indica con los vectores de velocidad relativa correspondientes a las cuatro caras del edificio para cada uno de los 5 niveles ( $h_0$ - $h_5$ ). Los números que se encuentran entre paréntesis (de izquierda a derecha) indican la admitancia, coherencia y fase con respecto al nivel  $h_5$ ..... 35
- Figura 20. Cara Norte: componente horizontal en la dirección E-O. Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad en los diferentes niveles de la cara Norte del edificio-prueba sin daño obtenidos a partir de: **a.** vibración ambiental; **b.** vibración forzada, y **c.** sismo..... 39
- Figura 21. Cara Sur: componente horizontal en la dirección E-O. Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad en los diferentes niveles de la cara Sur del edificio-prueba sin daño obtenidos a partir de: **a.** vibración ambiental; **b.** vibración forzada, y **c.** sismo..... 40
- Figura 22. Cara Este: componente horizontal en la dirección N-S. Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad en los diferentes niveles de la cara Este del edificio-prueba sin daño obtenidos a partir de: **a.** vibración ambiental; **b.** vibración forzada, y **c.** sismo..... 41
- Figura 23. Cara Oeste: componente horizontal en la dirección N-S. Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad en los diferentes niveles de la cara Oeste del edificio-prueba sin daño obtenidos a partir de: **a.** vibración ambiental; **b.** vibración forzada, y **c.** sismo..... 42

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura 24. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración ambiental a 4.43 Hz. Modo traslacional dominante en la dirección Norte-Sur y modo torsional. ....	44
Figura 25. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración forzada a 4.43 Hz. Modo traslacional dominante en la dirección Norte-Sur y modo torsional. ....	45
Figura 26. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración ambiental a 6.79 Hz. ....	46
Figura 27. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración forzada a 6.80 Hz. ....	47
Figura 28. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración ambiental a 8.0 Hz. ....	48
Figura 29. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración forzada a 7.85 Hz. ....	49
Figura 30. Variancia porcentual de cada una de las Componentes Principales de la matriz "A". ....	50
Figura 31. Espectro de las dos primeras Componentes Principales de la matriz A que a su vez corresponden a los dos primeros modos del edificio-prueba. ....	51
Figura 32. Forma modal del edificio-prueba sin daño correspondiente al la primera Componente Principal resultante de la DVS. Los eigenvectores que se indican en la figura se normalizaron con el eigenvector del nivel h5N. ....	52

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura 33. Forma modal del edificio-prueba sin daño correspondiente a la segunda Componente Principal resultante de la DVS. Los eigenvectores que se indican en la figura se normalizaron con el eigenvector del nivel h5N. ....	53
Figura 34. <b>a.</b> Traslación en la dirección Este-Oeste del edificio-prueba sin daño. <b>b.</b> Torsión calculada con las caras Norte y Sur. <b>c.</b> Traslación en la dirección Norte-Sur. <b>d.</b> Torsión calculada con las caras Este y Oeste. ....	55
Figura 35. Balanceo de la base en la dirección Norte-Sur. <b>a.</b> vibración ambiental. <b>b.</b> vibración forzada. <b>c.</b> sismo. ....	58
Figura 36. Balanceo de la base en la dirección Este-Oeste. <b>a.</b> vibración ambiental. <b>b.</b> vibración forzada. <b>c.</b> sismo. ....	59
Figura 37. Pandeo de la base o torsión. <b>a.</b> vibración ambiental. <b>b.</b> vibración forzada. <b>c.</b> sismo. ....	61
Figura 38. Cara Norte: Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad horizontal en la dirección E-O en los diferentes niveles de la cara norte del edificio-prueba con daño, obtenidos a partir de: <b>a.</b> vibración ambiental y <b>b.</b> vibración forzada. ....	63
Figura 39. Cara Sur: Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad horizontal en la dirección E-O en los diferentes niveles de la cara sur del edificio-prueba con daño, obtenidos a partir de: <b>a.</b> vibración ambiental y <b>b.</b> vibración forzada. ....	64

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura 40. Cara Este: Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad horizontal en la dirección N-S en los diferentes niveles de la cara este del edificio-prueba con daño, obtenidos a partir de: <b>a.</b> vibración ambiental y <b>b.</b> vibración forzada.....	65
Figura 41. Cara Oeste: Espectro de amplitud de las observaciones de velocidad horizontal en la dirección N-S en los diferentes niveles de la cara oeste del edificio-prueba con daño, obtenidos a partir de vibración ambiental.....	66
Figura 42. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración ambiental a 2.0 Hz. ....	68
Figura 43. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración forzada a 2.0 Hz.....	69
Figura 44. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración ambiental a 5 Hz.....	70
Figura 45. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración forzada a 5 Hz.....	71
Figura 46. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración ambiental a 6.88 Hz. ....	72
Figura 47. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración forzada a 6.9 Hz.....	73
Figura 48. Variancia porcentual de cada una de las Componentes Principales de la matriz "A". ....	74

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura 49. Espectro de las tres primeras Componentes Principales de la matriz A. ....	75
Figura 50. Forma modal del edificio-prueba con daño correspondiente a la primera Componente Principal que resulta de aplicar la DVS a la matriz A. Los eigenvectores que se indican en la figura están normalizados con el eigenvector del nivel h5N. ....	76
Figura 51. Forma modal del edificio-prueba con daño correspondiente a la segunda Componente Principal que resulta de aplicar la DVS a la matriz A. Los eigenvectores que se indican en la figura están normalizados con el eigenvector del nivel h5N. ....	77
Figura 52. Forma modal del edificio-prueba con daño correspondiente a la tercera Componente Principal que resulta de aplicar la DVS a la matriz A. Los eigenvectores que se indican en la figura están normalizados con el eigenvector del nivel h5N. ....	78
Figura 53. <b>a.</b> Traslación en la dirección Este-Oeste del edificio-prueba con daño. <b>b.</b> Torsión calculada con las caras Norte y Sur. <b>c.</b> Traslación en la dirección Norte-Sur. <b>d.</b> Torsión calculada con las caras Este y Oeste. ....	80
Figura 54. Balanceo de la base en la dirección Norte-Sur. <b>a.</b> vibración ambiental. <b>b.</b> vibración forzada. ....	82
Figura 55. Balanceo de la base en la dirección Este-Oeste. <b>a.</b> vibración ambiental. <b>b.</b> vibración forzada. ....	83

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura 56. Pandeo de la base o torsión. <b>a.</b> vibración ambiental. <b>b.</b> vibración forzada.....	84
Figura 57. <b>a.</b> Componente horizontal en la dirección Este-Oeste, cara norte. <b>b.</b> Componente horizontal en la dirección Este-Oeste, cara Sur. <b>c.</b> Componente horizontal en la dirección Este-Oeste, cara este.....	86
Figura 58. Respuesta del edificio-prueba reparado para la componente espectral de vibración ambiental a 3.3 Hz.....	88
Figura 59. Respuesta del edificio-prueba reparado para la componente espectral de vibración ambiental a 6.1 Hz.....	89
Figura 60. Respuesta del edificio-prueba reparado para la componente espectral de vibración ambiental a 9 Hz.....	90
Figura 61. <b>a.</b> Traslación en la dirección Este-Oeste del edificio prueba. <b>b.</b> Torsión calculada con las caras Norte y Sur.....	91
Figura 62. Espectros de amplitud de las observaciones de vibración ambiental del edificio-prueba sin daño, con daño y reparado. ....	93
Figura 63. Amplitud relativa de la torsión y de la traslación en la dirección Este-Oeste del edificio-prueba: <b>a.</b> sin daño. <b>b.</b> con daño. <b>c.</b> reparado.....	96
Figura 64. Vista del patrón de fisuras o daños a la: <b>a.</b> compresión y a la <b>b.</b> tensión en la dirección de las cargas en el edificio-prueba. Los números indican las diferencias porcentuales de la desviación estándar de la fase del modo traslacional en la dirección Este-Oeste del edificio-prueba con daño con respecto al edificio sin daño en los diferentes niveles ho-h5.....	100

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen y cronograma de las observaciones de vibración en el edificio-prueba sin daño.....	26
Tabla 2. Resumen y cronograma de las observaciones de vibración en el edificio-prueba con daño.....	26
Tabla 3. Resumen y cronograma de las observaciones de vibración en el edificio-prueba una vez reparado.....	27
Tabla 4. Funciones de vibración sintética en cada una de las caras y niveles del edificio-prueba.....	34
Tabla 5. Edificio-prueba sin daño. Modo traslacional en la dirección Este-Oeste. Método de espectros cruzados. Se indica el intervalo de confianza al 90% en la desviación estándar de la fase.....	98
Tabla 6. Edificio-prueba con daño. Modo traslacional en la dirección Este-Oeste. Método de espectros cruzados. Se indica el intervalo de confianza al 90% en la desviación estándar de la fase.....	98
Tabla 7. Edificio-prueba reparado. Modo traslacional en la dirección Este-Oeste. Método de espectros cruzados. Se indica el intervalo de confianza al 90% en la desviación estándar de la fase.....	98
Tabla 8. Diferencias porcentuales de la desviación estándar de la fase del edificio-prueba con daño con respecto al edificio-prueba sin daño.....	99
Tabla 9. Diferencias porcentuales de la desviación estándar de la fase del edificio-prueba con reparado con respecto al edificio-prueba sin daño.....	101

## 1. Introducción

La Ingeniería Civil estudia la respuesta dinámica de estructuras. En ocasiones, se diseñan estructuras que resultan muy susceptibles a la acción de cargas dinámicas producidas por la acción del viento y sismos, además de otras menos consideradas, como las producidas por máquinas, vehículos y ascensores. Además, las exigencias de seguridad y confort en las estructuras son mayores ahora que en el pasado por lo que es necesario realizar un estudio detallado de sus propiedades dinámicas (modos naturales de oscilación), ya sea mediante modelado o por el análisis de sus vibraciones.

Instrumentar un edificio con sismómetros provee una oportunidad de observar y de entender mejor sus propiedades dinámicas, frecuencias naturales y formas modales. El estudio de las vibraciones de las estructuras ha demostrado que sus frecuencias de vibración pueden variar significativamente de un terremoto a otro e inclusive con el tiempo. Una de las metas de la instrumentación de un edificio es entender estos cambios lo que, además, es crítico si el estudio de estos cambios es usado como una herramienta de evaluación de daños ante una solicitud sísmica.

Por fortuna, no es necesario esperar a que ocurra una solicitud sísmica o terremoto para estudiar la respuesta de un edificio ya que es suficiente con observar pequeños niveles de excitación que pueden ser originados tanto por vibración ambiental como forzada, es decir, experimentalmente. Las técnicas de vibración forzada y vibración ambiental para pruebas en edificios son muy similares. Ambos métodos se basan en pequeños niveles de excitación, por lo que pueden ser usados para determinar varias formas modales y frecuencias características de vibración y sus correspondientes valores de amortiguamiento.

Los estudios de vibración ambiental se han usado con éxito desde hace más de 35 años para la identificación de las características dinámicas de edificaciones

(Ivanovic *et al.*, 2000). En particular, el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en colaboración con la Universidad de California, San Diego (UCSD) ha trabajado en conjunto desde 1989 en el estudio de pruebas de vibración ambiental en edificios.

Se ha demostrado que este tipo de estudios permite determinar frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamiento de edificaciones. Como el caso del Hospital General de Mexicali el cual fue dañado por los terremotos de Superstition Hills de 1987 ( $M_s = 6.2$  y  $M_s = 6.6$ ), reforzado y vuelto a uso en 1991 (Mendoza *et al.*, 1991).

Estos estudios también pueden ser usados para validar modelos analíticos (Ventura *et al.*, 2002; Lord *et al.*, 2004), que predicen la respuesta de la estructura ante las cargas de servicio esperada. Una aplicación importante de los experimentos de vibración ambiental en edificaciones consiste en observar el efecto del reforzamiento sismo-resistente antes y después de la intervención (Ruiz *et al.*, 2000; Tischer *et al.*, 2006). También se ha hecho el intento de analizar en tiempo real las formas modales de una edificación empelando modelos analíticos que se van calibrando con los registros de vibraciones ambientales, con la finalidad de estimar la existencia, ubicación y magnitud del daño en una estructura (Lynch and Loh., 2006).

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Generales**

En este trabajo, se procesan y analizan registros tanto de vibración ambiental como de vibración forzada en un edificio experimental de cinco pisos que fue construido a escala real en el campus de la Universidad de California en San Diego (UCSD). Los registros de vibración fueron obtenidos por el grupo de Sismología Aplicada a Ingeniería del Departamento de Sismología del CICESE, por invitación del Dr. Enrique Luco, profesor de la UCSD y colaborador del proyecto del edificio experimental. Este fue el primer edificio a escala real, construido en el año 1992, para realizar pruebas de resistencia sísmica en los Estados Unidos. La obra fue financiada por la National Science Foundation, The Department of Energy, la industria del bloque, en particular The Masonry Association of California and Nevada, y The Masonry Institute of America. El CICESE colaboró en este proyecto 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.

En esta Tesis se procesa por primera vez esta base de datos. El edificio construido a escala real en el campus de la UCSD es referido como el edificio-prueba.

El análisis de los cambios en las propiedades dinámicas del edificio-prueba se presenta en 3 etapas:

- Edificio sin daño: edificio recién construido
- Edificio con daño: edificio dañado por medio de una simulación de carga sísmica mediante un sistema de cargas laterales aplicadas con diez actuadores hidráulicos servo-controlados.
- Edificio reparado

### 1.1.2. Particulares

El experimento representa una oportunidad para establecer los siguientes objetivos particulares de esta Tesis:

1. Diseño y empleo de Técnicas de Identificación de Sistemas (TIS), para identificar cambios en el comportamiento dinámico estructural (frecuencias características y formas modales en movimientos horizontales y verticales), que nos permitan determinar cambios importantes en la estructura.
2. Análisis de la información de las pruebas de vibración ambiental y vibración forzada en el edificio-prueba para estimar los siguientes parámetros:
  - a) Formas modales
  - b) Frecuencias características
3. Análisis de las pruebas de vibración ambiental y vibración forzada del edificio-prueba una vez que éste fue dañado, para determinar cambios en:
  - a) Formas modales
  - b) Frecuencias características
4. Localización del daño en el edificio-prueba a partir de los cambios observados en sus formas modales y en la variancia de las diferencias de fase entre los diversos niveles del edificio-prueba.
5. Análisis de las pruebas de vibración ambiental del edificio-prueba una vez que éste fue reparado, para determinar el grado de recuperación de sus formas modales.

## 1.2. Descripción de la estructura

### 1.2.1. Edificio recién construido

El edificio-prueba (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.

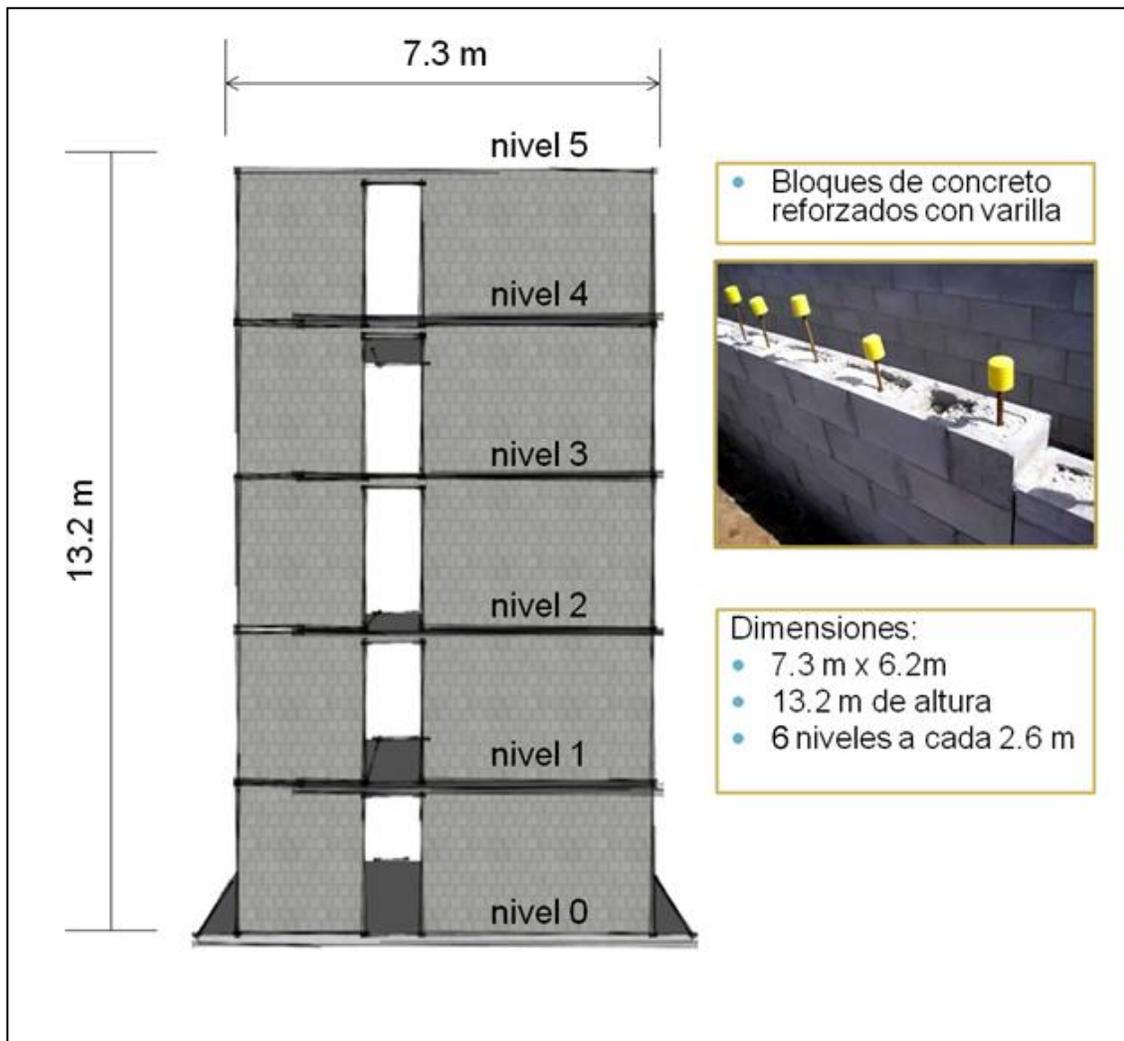


Figura 1. Fachada frontal y dimensiones del edificio-prueba.

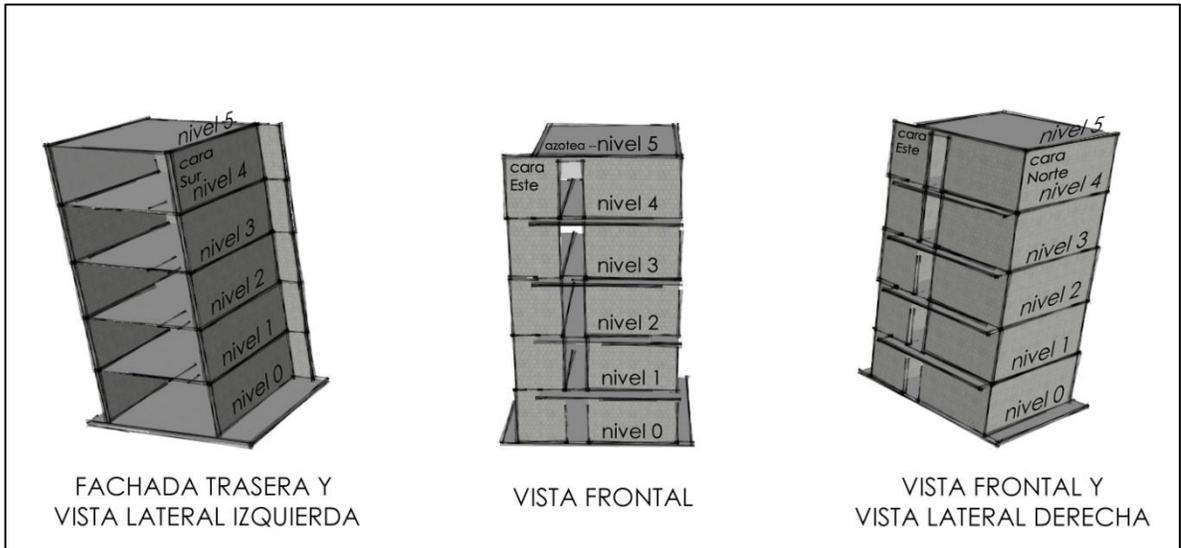


Figura 2. Vistas frontal y laterales del edificio-prueba.

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-prueba. La Figura 3 muestra la *Pared de Reacción* y la distribución de los actuadores hidráulicos.

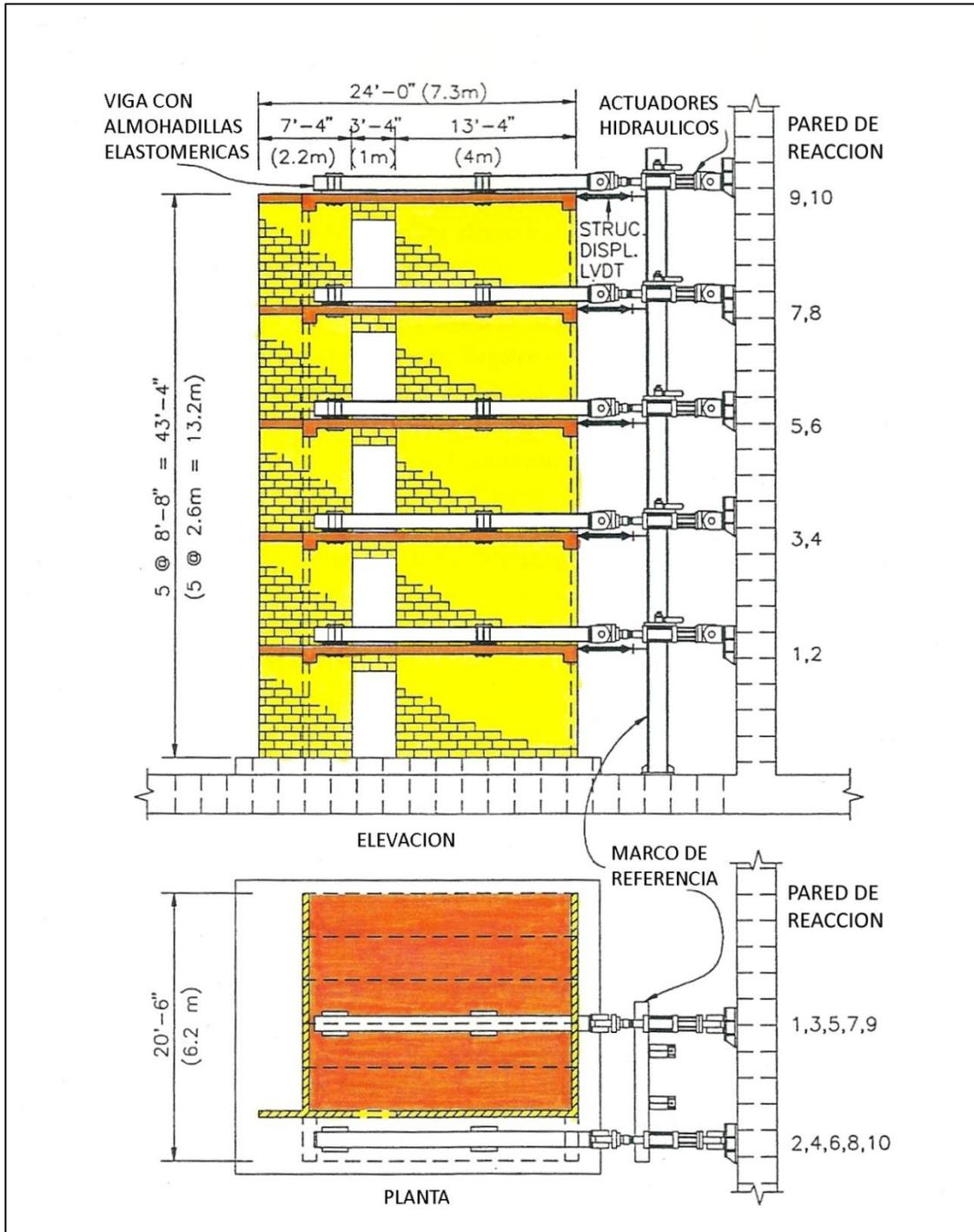


Figura 3. Pared de Reacción y distribución de los actuadores hidráulicos sobre la cara norte del edificio-prueba. Figura modificada de Seible *et al.* (1994).

El edificio-prueba surgió bajo la iniciativa del U.S.-TCCMAR (United States – Technical Coordinating Committee for Masonry Research), 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-prueba, 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.

El edificio-prueba es solamente un módulo o sub-sección 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; la figura muestra también la dirección de la carga sísmica simulada.

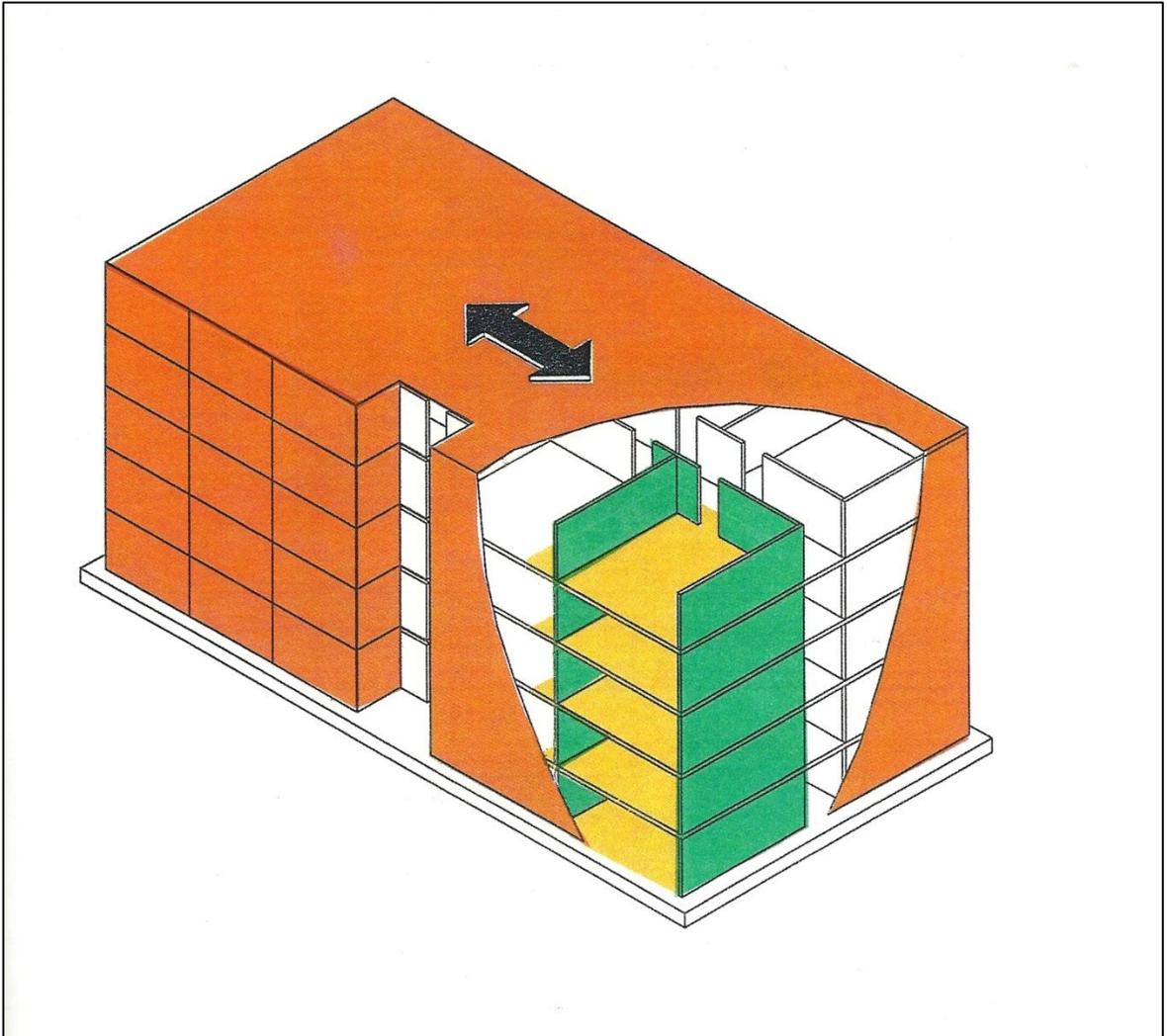


Figura 4. Edificio-prueba como parte de una estructura simétrica típica para unas oficinas de bloque de concreto o un edificio con departamentos. Las flechas en el techo del edificio indican la dirección de la carga sísmica simulada. Figura tomada de Seible *et al.* (1994).

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.

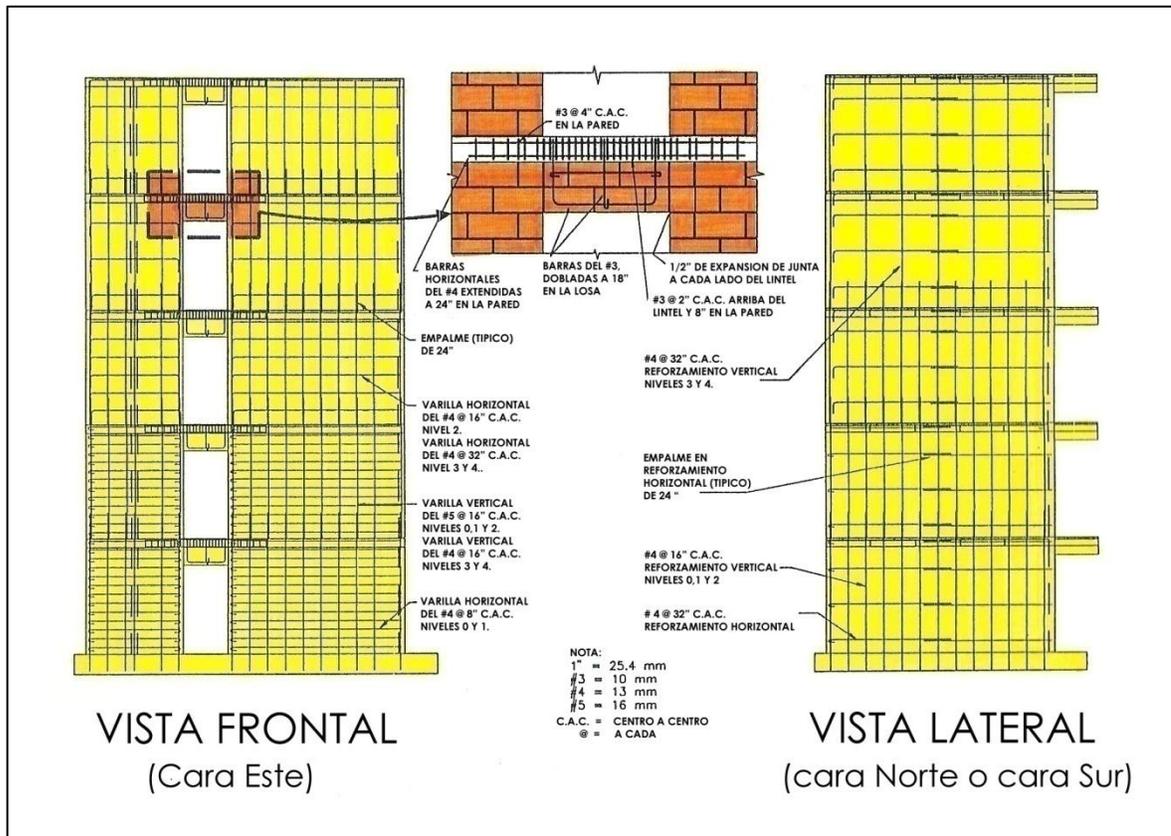


Figura 5. Reforzamiento estructural de las paredes del edificio-prueba. Figura modificada de Seible *et al.* (1994).

En todos los niveles del edificio-prueba, se utilizó bloque de concreto tipo viga "Bond Beam" de 6x8x16 pulgadas o 150x200x400 mm, de una sola abertura, como se indica en la Figura 6.

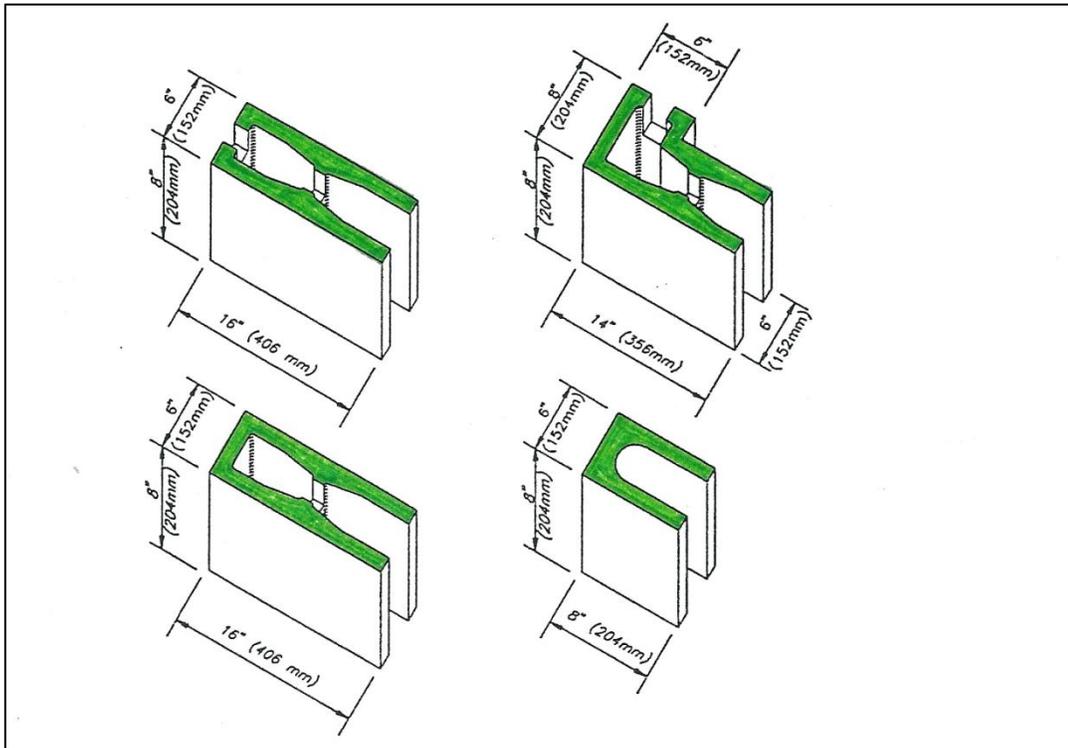


Figura 6. Unidades de bloque de concreto utilizadas en el edificio-prueba. Figura tomada de Seible *et al.* (1994).

Los estándares de diseño que se utilizaron para el edificio-prueba corresponden a los indicados por NEHRP (*National Earthquake Hazards Reduction Program; Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings*). 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-prueba.

### 1.2.2. Edificio con daño

Para dañar al edificio-prueba en 1992, 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 (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-prueba hasta llegar al límite de su estado lineal, fueron: el terremoto de San Fernando de 1971 ( $M_w=6.6$ ), 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 empalmaron para construir un sismograma sintético que prácticamente coincidiera con el espectro de diseño UBC-S2, en un rango de periodos de 0.2 a 0.6 s, que es el rango esperado de la respuesta fundamental del edificio-prueba.

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 x 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 (Figura 7a). 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 (Figura 7b).

Uno de los objetivos de la U.S.-TCCMAR al experimentar con el edificio-prueba a escala real, con cargas o desplazamientos sísmicos simulados, fue observar la nueva respuesta del edificio en el límite de su estado lineal. La secuencia utilizada

en los actuadores hidráulicos para alcanzar el estado límite del edificio fue la siguiente: estado inicial sin grietas o fisuras; primer grieta en las paredes y losas de piso; primer rendimiento en las paredes y losas de piso; la formación del estado plástico a nivel global, y por último, llegar al límite de su estado lineal al pie de las paredes.

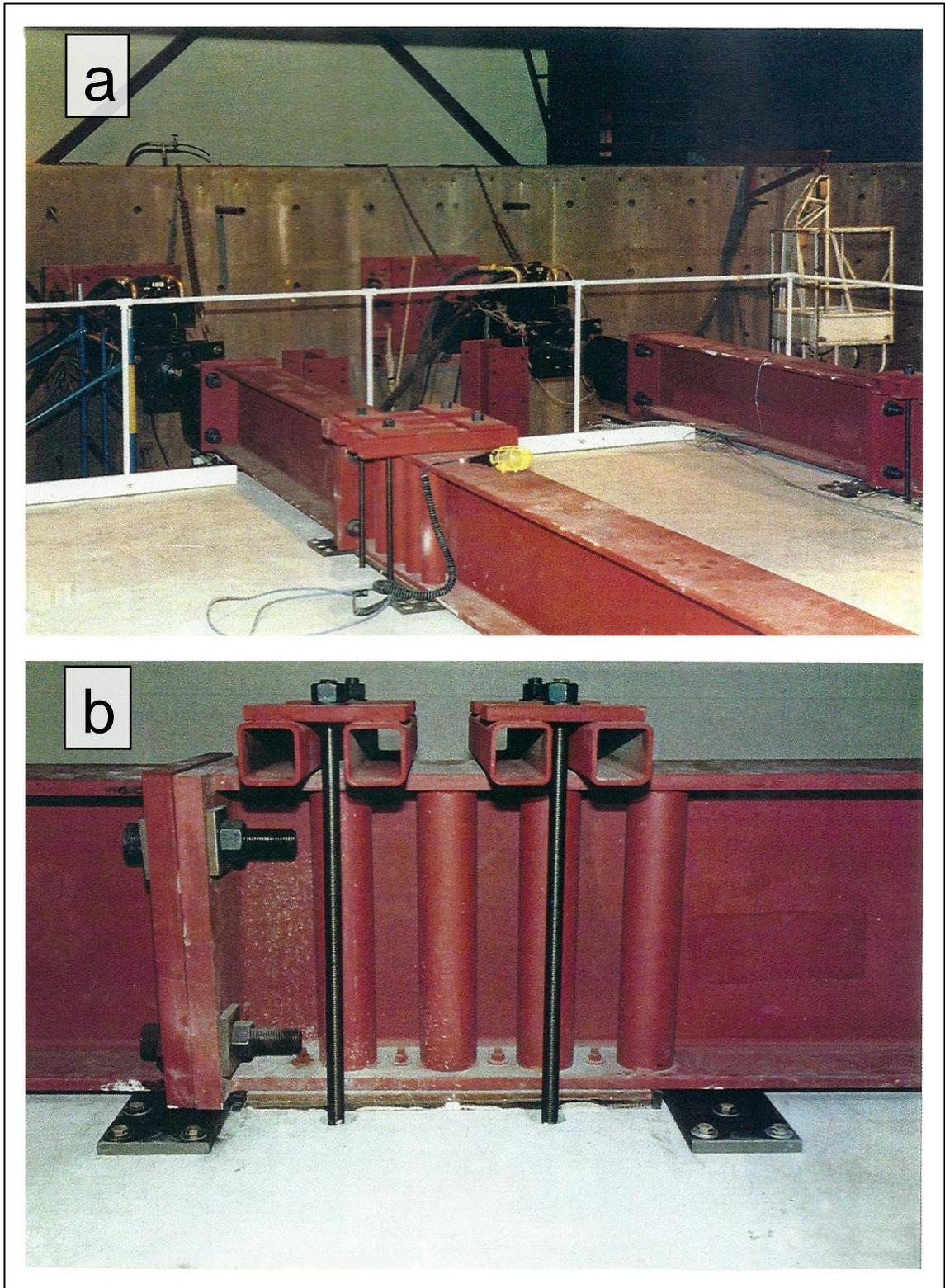


Figura 7. Conexión de la carga rígida a la losa. **a.** viga W 18 x 97. **b.** Barras exteriores de alta resistencia. Fotografía tomada de Seible *et al.* (1994).

### 1.2.3. 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-prueba nuevas técnicas de reparación para los edificios de bloque de concreto.

Cabe mencionar que el edificio-prueba fue diseñado para controlar 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 (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-prueba fueron:

- Utilización de un concreto a base de polimeros (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 (Figura 8).
- Reconstrucción y reforzamiento en la base de las uniones entre las paredes del nivel 0 del edificio-prueba (Figura 8).
- 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” (Figura 8).
- Reforzamiento de los dinteles (Figura 9).
- Capas de fibra de carbón en 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 (Figura 9 y 10).

Una vez reparado el edificio-prueba, se obtuvieron datos de vibración ambiental para identificar y cuantificar los cambios en la respuesta del edificio en comparación con la respuesta del edificio sin daño o recién construido.

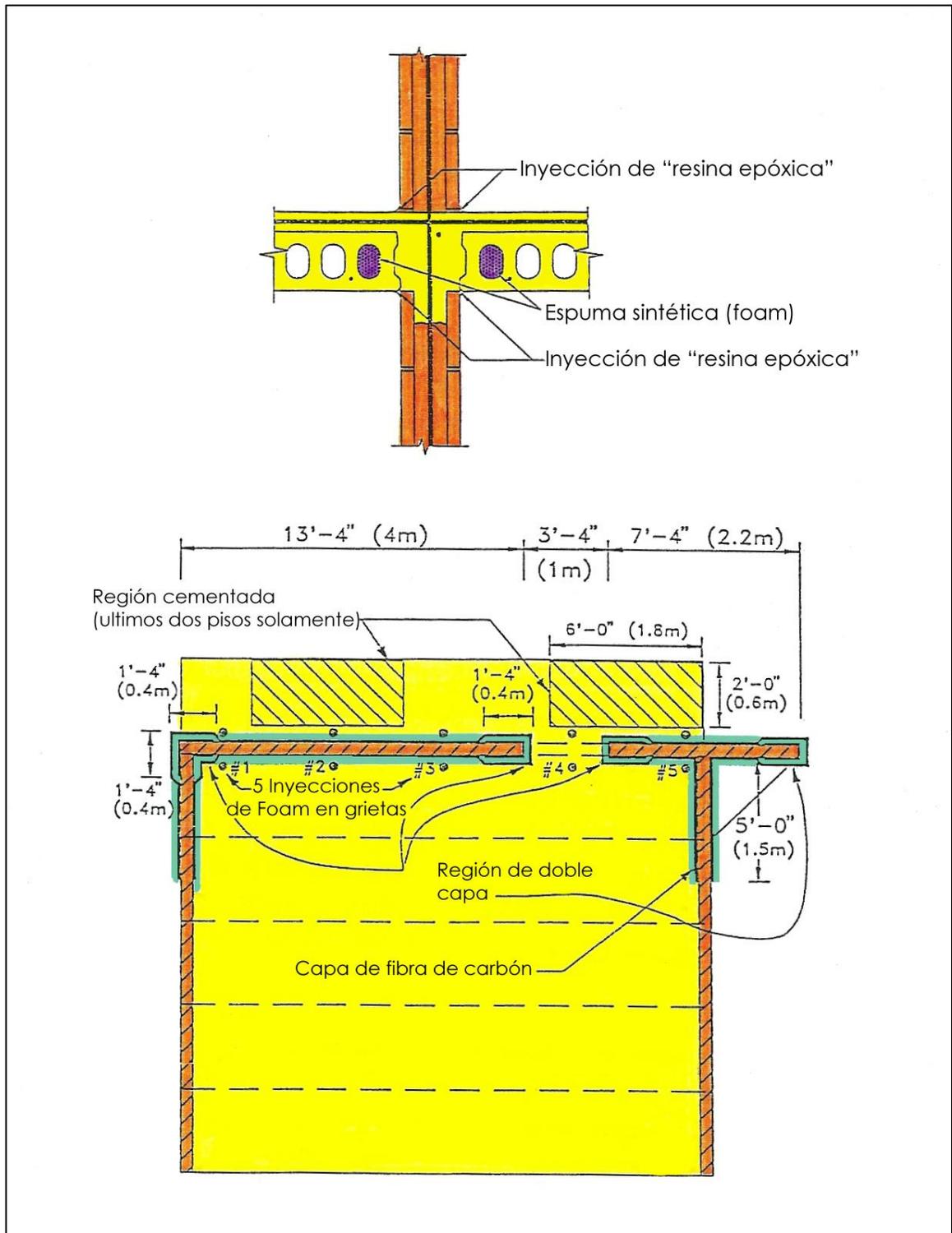


Figura 8. Vista de planta. Detalles de reparación de la pared y losa de piso. Figura modificada de Seible *et al.* (1994).

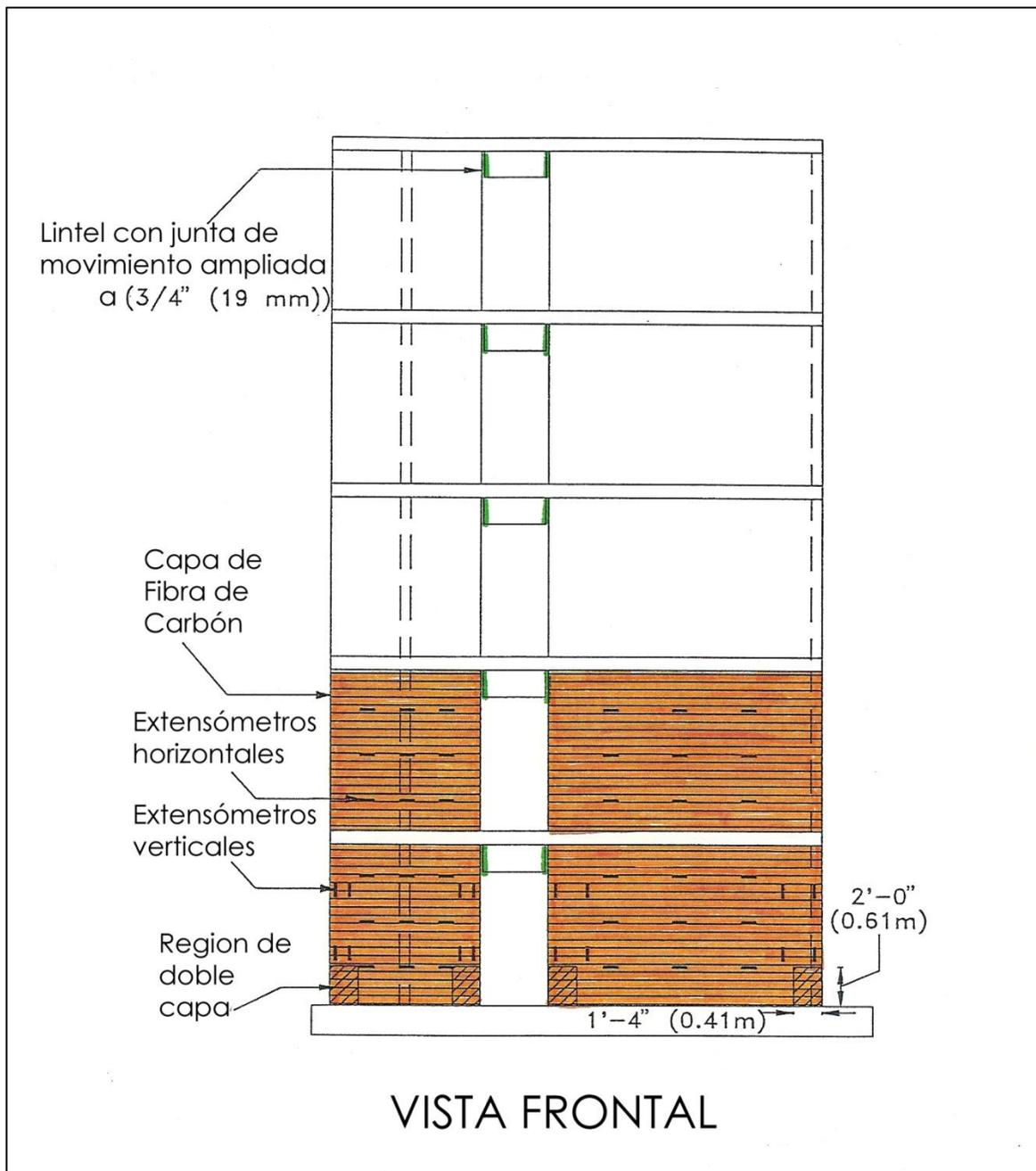


Figura 9. Vista de elevación. Capas de fibra de carbón. Figura modificada de Seible *et al.* (1994).

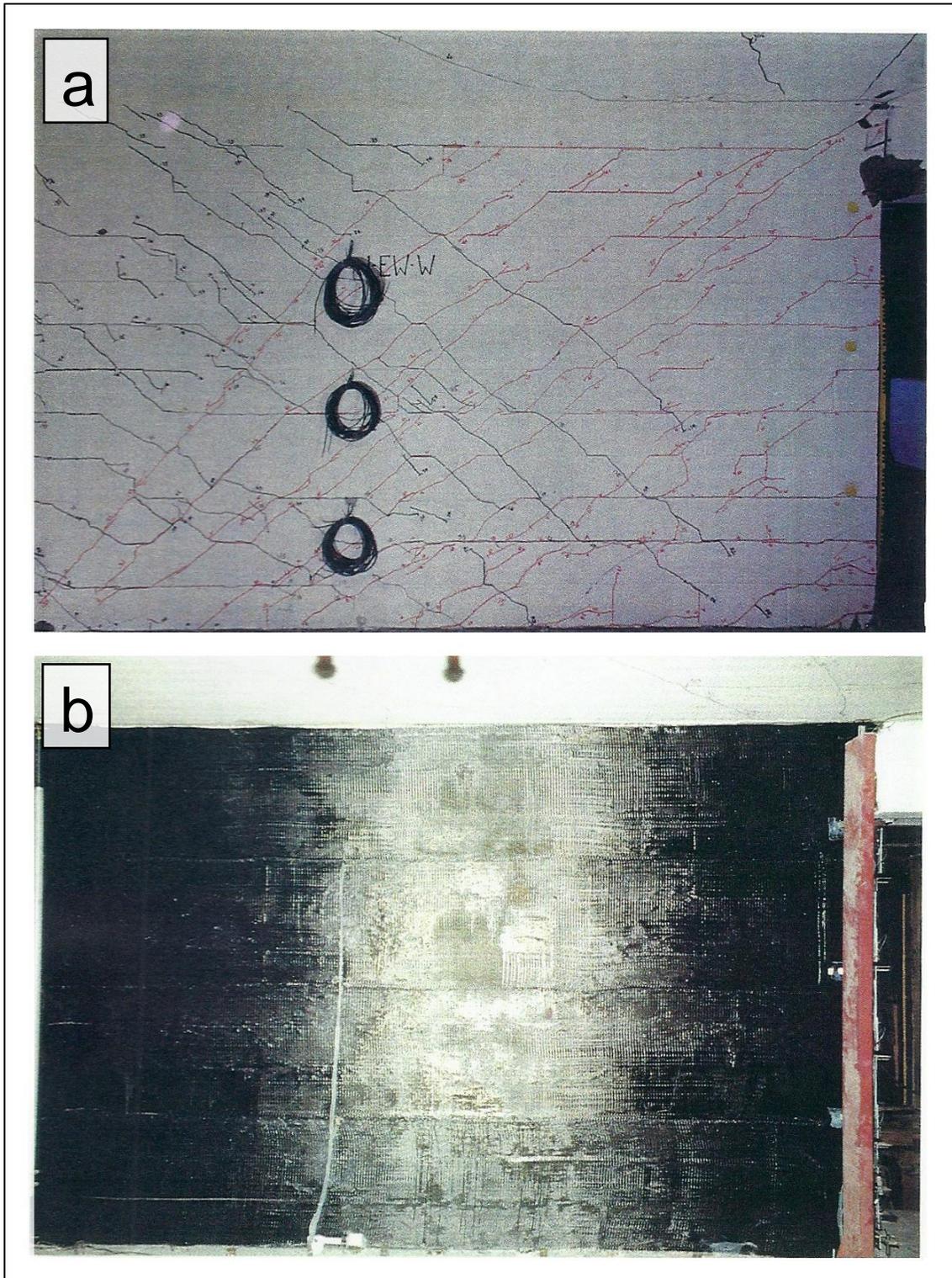


Figura 10. Nivel 0: Pared larga localizada en la cara este del edificio-prueba. **a.** pared con daño después de la simulación sísmica. **b.** Pared reparada con capas de fibra de carbón. Fotografía tomada de Seible *et al.* (1994).

### 1.3. Técnicas de Identificación de Sistemas (TIS)

TIS es un proceso para identificar las formas modales del edificio-prueba en sus tres etapas (edificio-prueba recién construido, edificio-prueba una vez dañado, y edificio-prueba ya reparado) mediante el análisis de sus vibraciones. Las principales formas modales que se espera identificar son un primer modo horizontal traslacional o modo fundamental y un primer modo horizontal torsional (Figura 11).

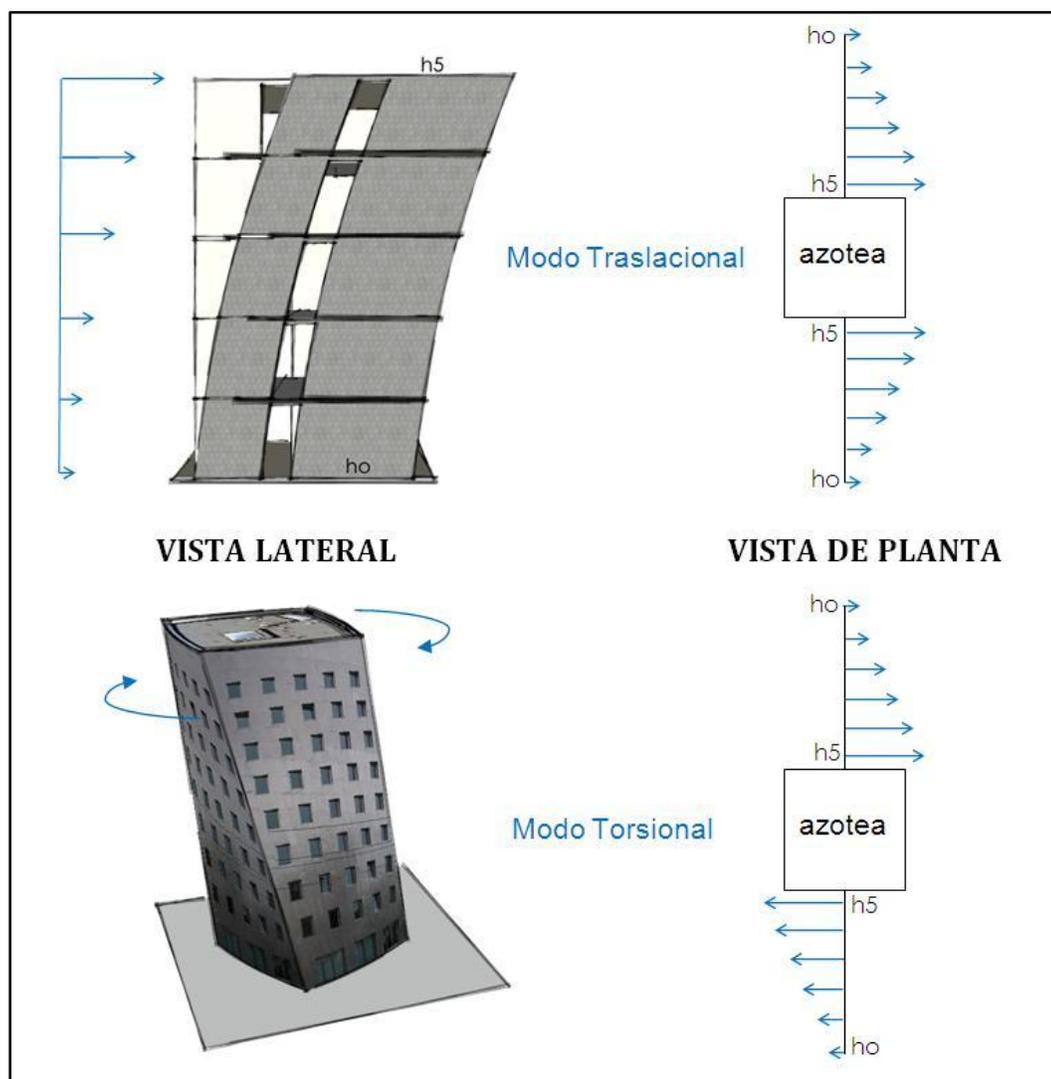


Figura 11. Vista en fachada y vista esquemática del primer modo horizontal traslacional y primer modo torsional de un edificio.

Los modos horizontales fuerzan a la cimentación de la estructura, produciendo a su vez los modos verticales en la base del edificio (Figura 12):

Balaceo (rocking): Observamos dos tipos de balaceo en la base del edificio debido a los modos horizontales traslacionales, balaceo en el eje Norte-Sur y balaceo en el eje Este-Oeste.

Pandeo o torsión de la base (warping): Observamos un tipo de deformación o torcedura de la base provocada por los modos horizontales torsionales del edificio.

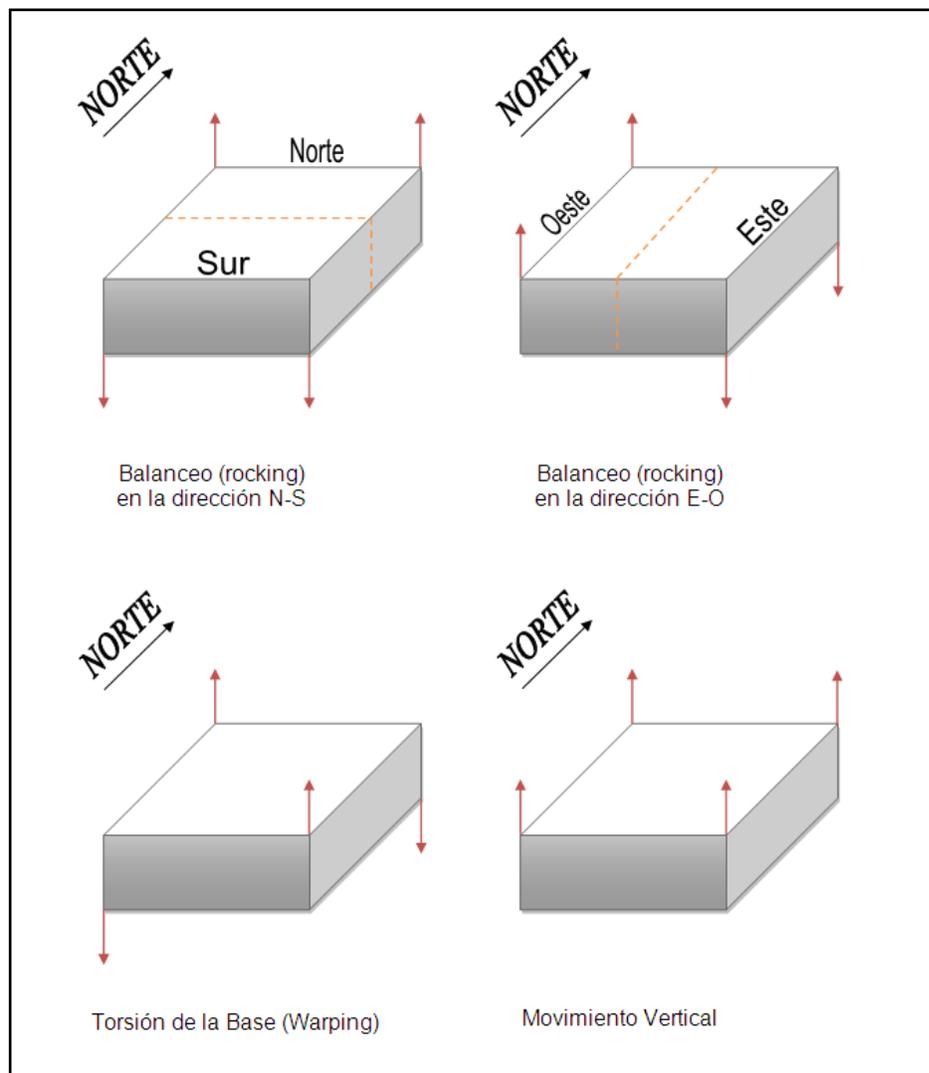


Figura 12. Tipos de movimientos verticales que se esperan en la base de un edificio.

### 1.1.1. Instrumentación de la estructura o edificio-prueba

Para conocer los cambios en las características dinámicas de los edificios, es necesario recurrir a la instrumentación sísmica para determinar, a intervalos adecuados de tiempo, los cambios en los modos normales de oscilación de la estructura. Esto implica determinar la cantidad y ubicación adecuada de los sensores necesarios para conocer la respuesta dinámica del edificio.

En 1992, el grupo Sismología Aplicada a Ingeniería del CICESE instrumentó el edificio-prueba con sismógrafos para obtener registros de sus vibraciones. Los sismógrafos se instalaron en julio de 1992 (edificio-prueba sin daño); noviembre de 1992 (edificio con daño) y agosto de 1993 (edificio reparado). Los datos se registraron con el sistema portátil Kinometrics SSR-1 (Solid State Recorder) empleando sensores de velocidad Mark L-4C. Los registros corresponden a las vibraciones en las direcciones Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical. Los instrumentos (Figura 13) fueron proporcionados por el laboratorio de Sismología Aplicada a Ingeniería del CICESE.



Figura 13. De izquierda a derecha: grabadora de datos SSR-1 y sensor de velocidades Mark L-4C.

Fueron colocados cuatro sensores de una componente horizontal en cada uno de los cinco niveles del edificio-prueba; 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 14(a, b, c). Esta misma localización de los sensores se empleó en el edificio con daño y reparado, tanto en las pruebas de vibración ambiental como forzada. En las pruebas de vibración forzada se empleó una mesa vibratoria colocada al sur del edificio-prueba.

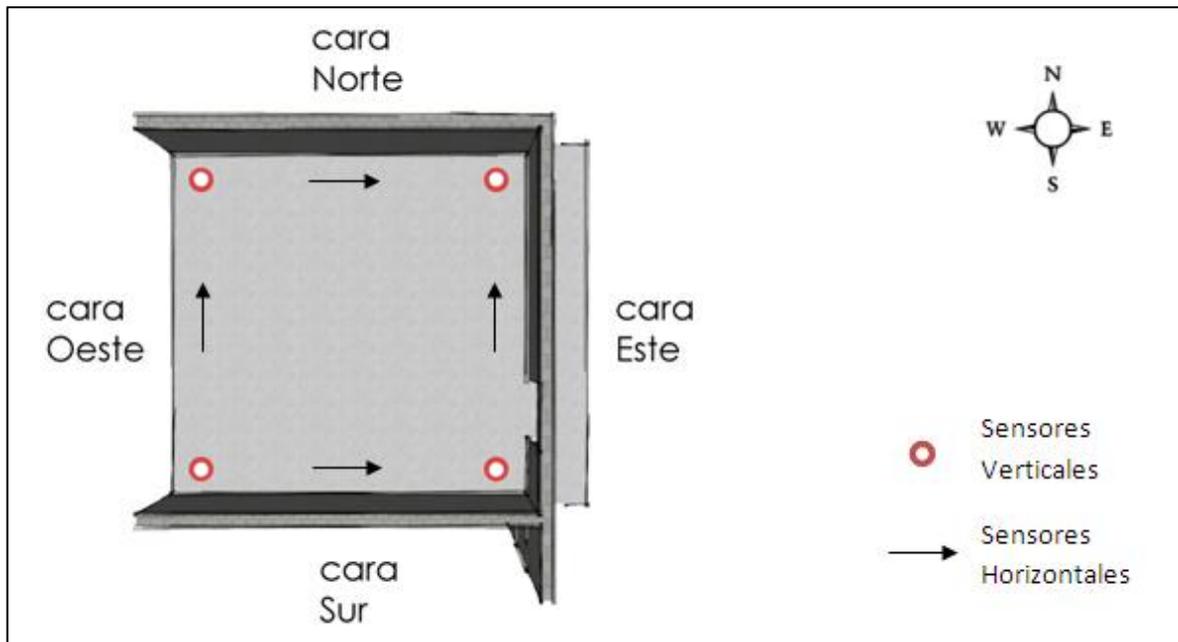


Figura 14a. Vista de planta del nivel cero del edificio prueba con la localización de los sensores verticales y horizontales.

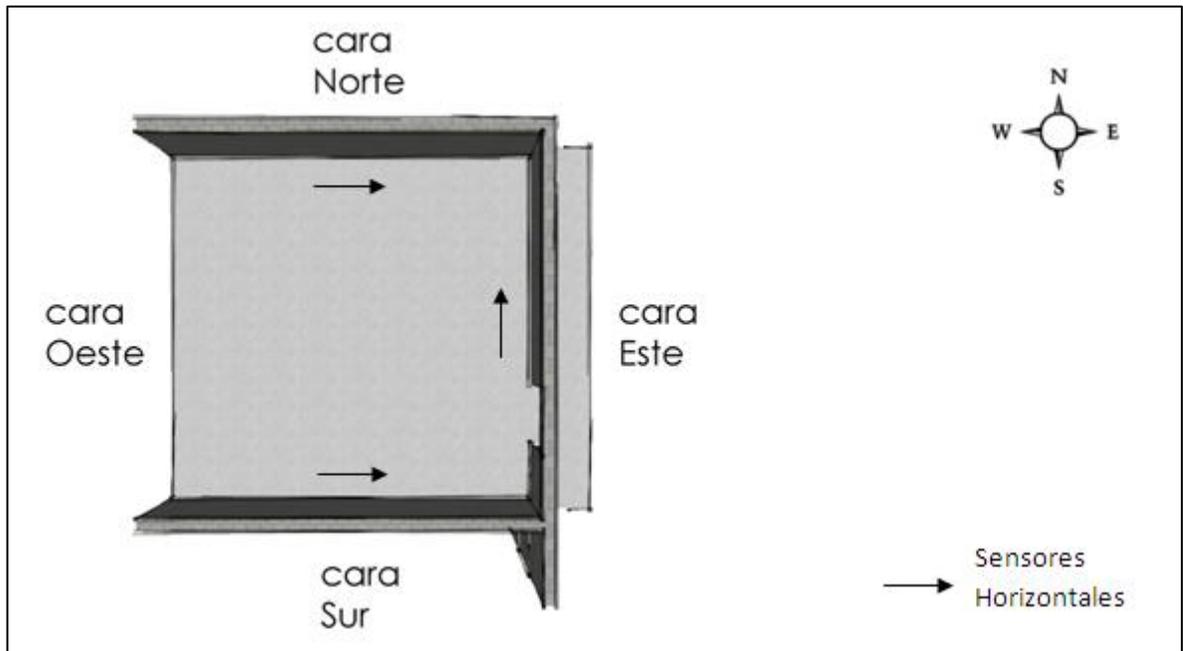


Figura 14b. Vista de planta de los niveles 1 a 4 del edificio prueba con la localización de los sensores horizontales.

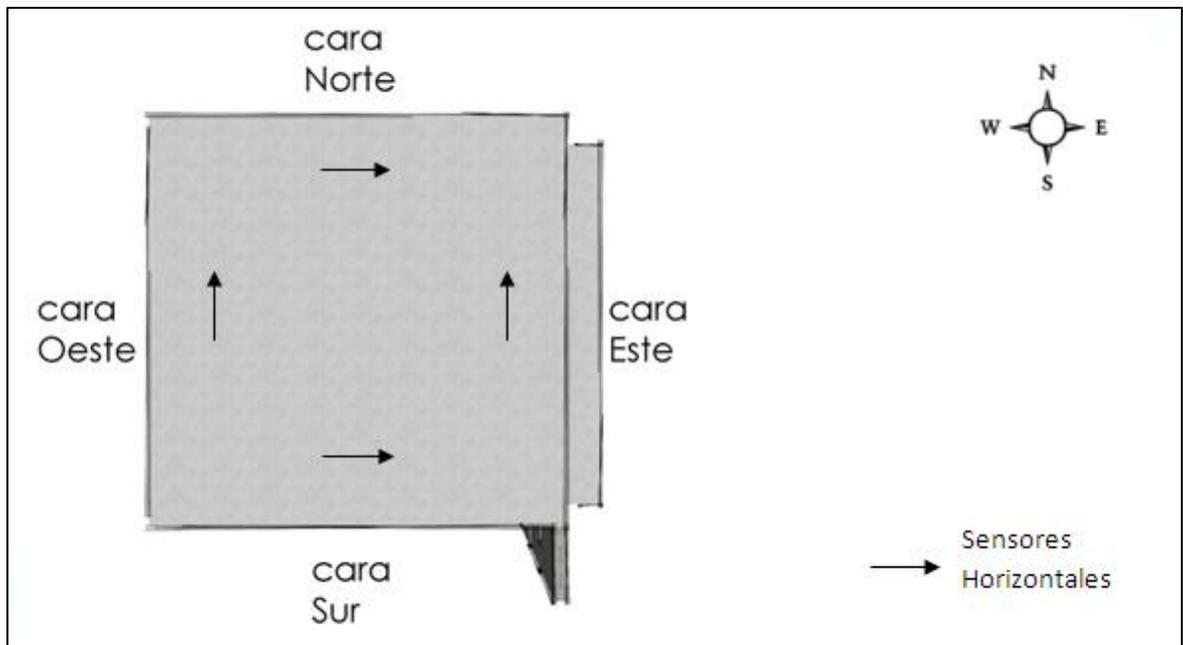


Figura 14c. Vista de planta de la azotea o nivel 5 del edificio prueba con la localización de los sensores horizontales.

### 1.1.2. Adquisición de datos

La instrumentación y las pruebas de vibración del edificio-prueba fueron las siguientes:

#### **Etapa I.** Edificio-prueba sin daño:

Se obtuvieron las observaciones de vibración ambiental, de vibración forzada y, casualmente, el registro de un sismo en el edificio-prueba recién construido. La Tabla 1 indica el cronograma de las observaciones de vibración. Por redundancia, se obtuvieron diferentes conjuntos de datos correspondientes a un mismo experimento.

#### **Etapa II.** Edificio-prueba con daño:

Corresponde a las observaciones de vibración ambiental y de vibración forzada (Tabla 2) en el edificio-prueba después de dañar al edificio con los actuadores hidráulicos, sin llegar a su estado no-lineal.

#### **Etapa III.** Edificio-prueba reparado:

Se obtuvieron las observaciones de vibración ambiental y de vibración forzada (Tabla 3) en el edificio-prueba una vez reparado.

El intervalo de muestreo en todos los registros de vibración ambiental y vibración forzada es de 0.01 s y la duración de cada una de las muestras 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-prueba vibraba con mayor amplitud. En particular, fueron necesarias 62 pruebas, una prueba por cada frecuencia, para completar un barrido en frecuencia en el rango de 4.10 Hz hasta 13.50 Hz.

Tabla 1. Resumen y cronograma de las observaciones de vibración en el edificio-prueba sin daño.

<b>Julio 1992 – Edificio-prueba sin Daño</b>					
<b>Fecha</b>	<b>Tipo de prueba</b>	<b>Nº de pruebas</b>	<b>Nº de canales horizontales</b>	<b>Nº de canales verticales</b>	<b>Nº total de canales</b>
10/07/92	Vibración Ambiental	6	20	4	24
11/07/92	Vibración Forzada	1	20	4	24
11/07/92	Vibración Ambiental	2	20	4	24
11/07/92	Sismos	1	20	4	24

Tabla 2. Resumen y cronograma de las observaciones de vibración en el edificio-prueba con daño.

<b>Noviembre 1992 – Edificio-prueba con Daño</b>					
<b>Fecha</b>	<b>Tipo de prueba</b>	<b>Nº de pruebas</b>	<b>Nº de canales horizontales</b>	<b>Nº de canales verticales</b>	<b>Nº total de canales</b>
20/11/92	Vibración Ambiental	7	18	--	18
21/11/92	Vibración Ambiental	5	18	--	18
21/11/92	Vibración Ambiental	5	14	4	18
21/11/92	Vibración Forzada	1	18	--	18
21/11/92	Vibración Forzada	1	14	4	18

Tabla 3. Resumen y cronograma de las observaciones de vibración en el edificio-prueba una vez reparado.

<b>Agosto 1993 – Edificio-prueba Reparado</b>					
<b>Fecha</b>	<b>Tipo de prueba</b>	<b>Nº de pruebas</b>	<b>Nº de canales horizontales</b>	<b>Nº de canales verticales</b>	<b>Nº total de canales</b>
03/08/93	Vibración Ambiental	6	18	3	21
03/08/93	Vibración Ambiental	6	17	4	21

Con la finalidad de verificar 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-prueba, se obtuvieron observaciones simultáneas de vibración ambiental en el edificio-prueba así como en la pared de reacción y en la azotea del laboratorio Charles Lee Powell. Los resultados de esta etapa se describen en el Apéndice A.

## 2. Metodología

Este capítulo describe la metodología propia de esta Tesis para procesar y analizar los registros de vibración ambiental y forzada. Esta consiste en la adaptación de los conceptos de Espectros Cruzados y de Descomposición en Valores Singulares para obtener las frecuencias características y las formas modales del edificio, subdividiendo o segmentando las series de tiempo con el propósito de evaluar la robustez de los resultados empleando el concepto de coherencia.

### 2.1. Control de calidad de los datos

Todos los registros (sensores de velocidad de vibración ambiental, vibración forzada y excitación sísmica), fueron inspeccionados visualmente. Se comprobó que todos los sensores hubiesen grabado correctamente y al mismo tiempo en las 4 caras y en los 5 niveles. En caso de que algún sensor no hubiese grabado simultáneamente, dicha muestra es desechada. También se desecharon muestras en donde se identificaron errores burdos como cuando la amplitud en una de las pruebas en un nivel determinado tiene varios órdenes de magnitud mayores que en las otras. La Figura 15 muestra una prueba que fue desechada y una prueba grabada correctamente.

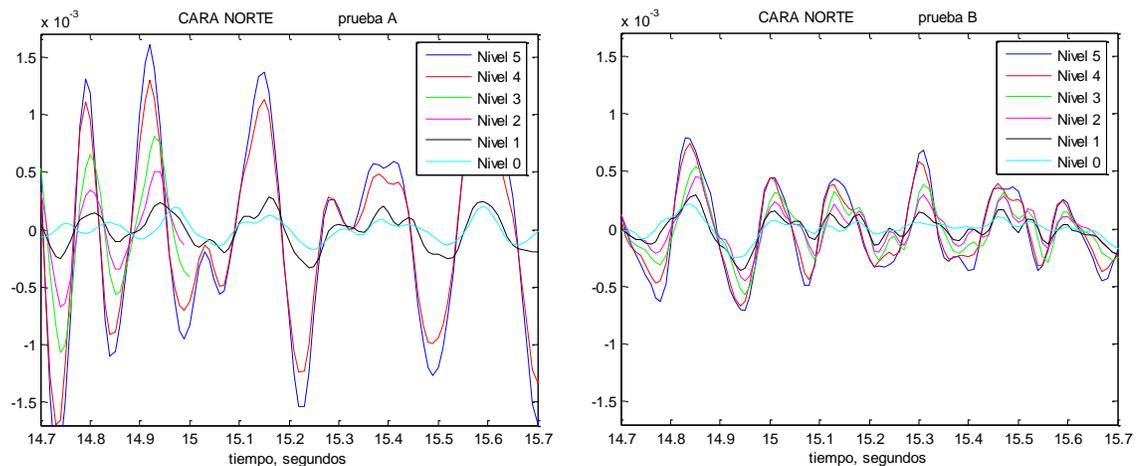


Figura 15. Componente Este-Oeste de la cara Norte en sus 6 niveles. Prueba A, desechada. El nivel 2 y nivel 3 dejan de grabar a los 15 segundos. Prueba B, grabada correctamente.

## 2.2. Identificación de frecuencias características y formas modales del edificio-prueba empleando la Transformada de Fourier

Una vez que se ha comprobado la calidad de los registros de velocidad se procede a identificar las frecuencias características de la estructura. Es común transformar los registros de los sismómetros al dominio de la frecuencia empleando la transformada de Fourier para obtener los espectros de amplitud.

Una vez identificadas las frecuencias a las que el edificio-prueba vibra con mayor amplitud, se procede a investigar las formas típicas de vibración del edificio para esas frecuencias, analizando los resultados para cada cara del edificio y sus respectivos niveles.

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, mediante los espectros cruzados del nivel 5 de la cara Norte, contra las demás caras y niveles del edificio. La respuesta en frecuencia entre dos niveles del edificio se define como (Bendat y Pierson, 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 los diferentes segmentos o intervalos de tiempo en los que se subdividieron los

registros  $x(t)$  e  $y(t)$ . A las estimaciones espectrales de los diferentes segmentos se les conoce también como particiones espectrales.

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. Una diferencia de fase negativa indica una fase de retraso con respecto al nivel 5 de la cara Norte mientras que una diferencia de fase positiva indica una fase de adelanto.

Para estimar la confiabilidad de la respuesta del edificio, se calculó la coherencia, también conocida como coherencia cuadrada (Bendat y Pierson, 1971),

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

La coherencia depende de la estabilidad de los cocientes espectrales en los diferentes segmentos o particiones espectrales. La coherencia 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 de los diferentes segmentos. Específicamente, la coherencia es mucho más susceptible a la variación de las diferencias de fase que de los cocientes de amplitud.

Los siguientes experimentos numéricos se diseñaron para ilustrar cómo la coherencia depende de la variancia tanto de las diferencias de fase, como de los

cocientes de amplitud, entre los diferentes segmentos de las funciones sintéticas  $x(t)$  y  $y(t)$  diseñadas para estos experimentos como:

$$x(t) = X_j \cos(\omega_o t + \theta_{x_j}), \quad (3)$$

$$y(t) = Y_j \cos(\omega_o t + \theta_{y_j}). \quad (4)$$

En las ecuaciones (3) y (4), la frecuencia  $\omega_o$  se mantiene constante en los diferentes segmentos  $j$  en los que se subdivide el eje del tiempo  $t$ .

**Caso I:** Las diferencias de fase entre los segmentos se distribuyen normalmente con respecto al promedio, manteniendo constantes los cocientes de amplitud de los diferentes segmentos. Las diferencias de fase se generan con un conjunto de números aleatorios con distribución normal, haciendo variar la desviación estándar desde  $1^\circ$  hasta  $30^\circ$  grados en cada uno de los experimentos. Los resultados se muestran en la Figura 16.

**Caso II:** Las amplitudes de los diferentes segmentos se hacen variar aleatoriamente alrededor una amplitud promedio, manteniendo constantes las diferencias de fase entre los diferentes segmentos. Los resultados se muestran en la Figura 17.

**Caso III:** Tanto las amplitudes como las fases se hacen variar aleatoriamente en los diferentes segmentos. Los resultados de la coherencia en función de la variancia de las amplitudes y de las diferencias de fase se muestran en la Figura 18.

Cabe mencionar que los resultados de los Casos I, II y III, son independientes de la frecuencia.

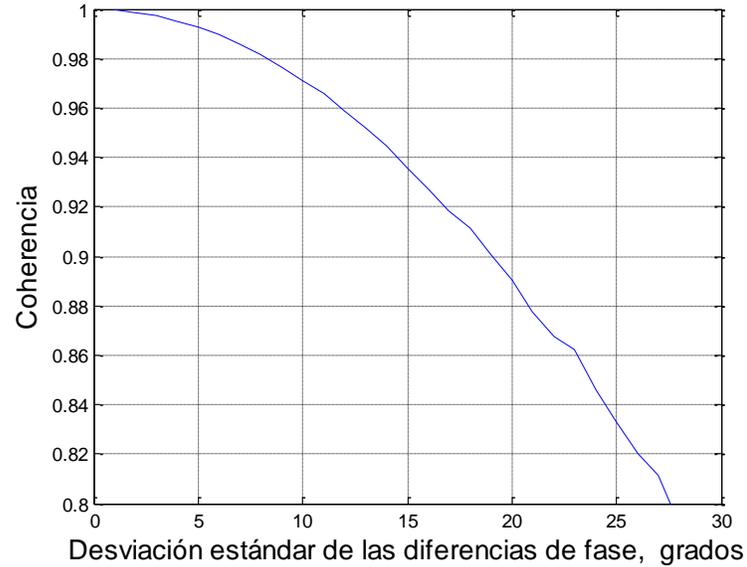


Figura 16. Caso I: Coherencia en función de la desviación estándar de las diferencias de fase entre los diferentes segmentos, manteniendo constantes los cocientes de amplitud.

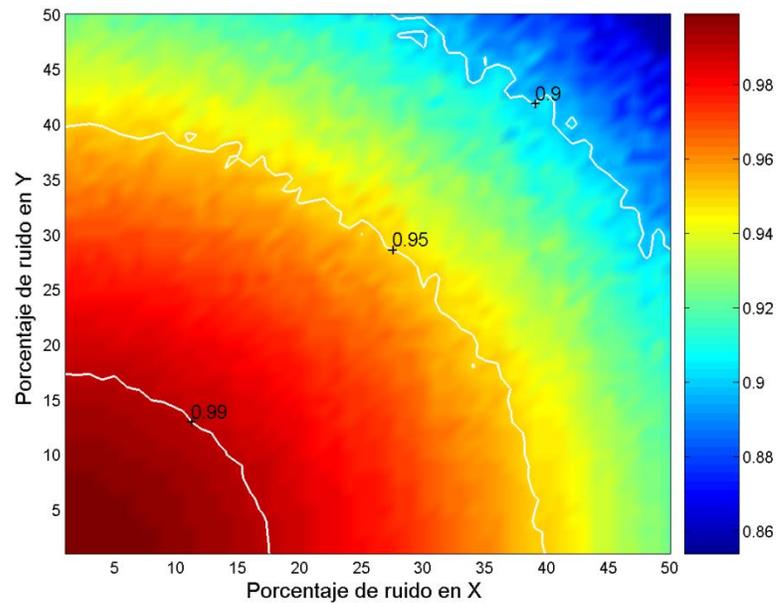


Figura 17. Caso II: Coherencia en función de los porcentajes de variación o nivel de ruido de la amplitud, manteniendo constantes las diferencias de fase entre los diferentes segmentos.

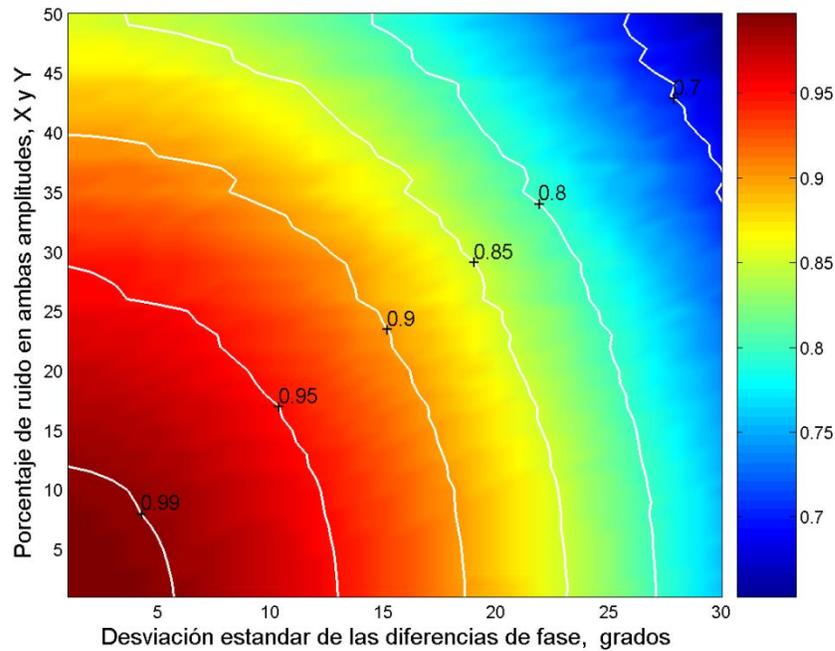


Figura 18. Caso III: Coherencia en función de la desviación estándar de las amplitudes y de las diferencias de fase.

En el caso particular de un edificio, considerando que el primer modo lateral es el de mayor amplitud, es de esperarse que, para este modo, los cocientes de amplitud entre dos pisos consecutivos se mantengan constantes o que la variación de estos cocientes debe ser muy pequeña, lo contrario sería un indicador de que existen daños severos entre ambos pisos. Lo mismo se puede decir de las variaciones de la diferencia de fase. Sin embargo, es necesario medir ambas variaciones cuando el edificio no tiene daños estructurales, para poder emplearlos como referencia ante posibles cambios importantes en las características dinámicas de la estructura.

El siguiente ejercicio con los datos sintéticos de la Tabla 4, se diseñó con la finalidad de facilitar la interpretación de la respuesta (admitancia, coherencia y fase, Figura 19) del edificio-prueba, para una frecuencia en particular. Los datos están diseñados de manera que la fase aumenta progresivamente en 10 grados conforme se baja del nivel cinco al nivel cero, manteniendo todas las amplitudes iguales a la unidad.

Tabla 4. Funciones de vibración sintética en cada una de las caras y niveles del edificio-prueba.

Nivel	Cara Norte	Cara Sur	Cara Este	Cara Oeste
<b>h5 (azotea)</b>	$h5N = \text{sen}(\omega_o t + 0)$	$h5S = \text{sen}(\omega_o t + 0)$	$h5E = \text{sen}(\omega_o t + 0)$	$h5W = \text{sen}(\omega_o t + 0)$
<b>h4</b>	$h4N = \text{sen}(\omega_o t + 10^\circ)$	$h4S = \text{sen}(\omega_o t + 10^\circ)$	$h4E = \text{sen}(\omega_o t + 0^\circ)$	-----
<b>h3</b>	$h3N = \text{sen}(\omega_o t + 20^\circ)$	$h3S = \text{sen}(\omega_o t + 20^\circ)$	$h3E = \text{sen}(\omega_o t + 20^\circ)$	-----
<b>h2</b>	$h2N = \text{sen}(\omega_o t + 30^\circ)$	$h2S = \text{sen}(\omega_o t + 30^\circ)$	$h2E = \text{sen}(\omega_o t + 30^\circ)$	-----
<b>h1</b>	$h1N = \text{sen}(\omega_o t + 40^\circ)$	$h1S = \text{sen}(\omega_o t + 40^\circ)$	$h1E = \text{sen}(\omega_o t + 40^\circ)$	-----
<b>h0</b>	$h0N = \text{sen}(\omega_o t + 50^\circ)$	$h0S = \text{sen}(\omega_o t + 50^\circ)$	$h0E = \text{sen}(\omega_o t + 50^\circ)$	$h0W = \text{sen}(\omega_o t + 50^\circ)$

Los vectores en la Figura 19 representan una fotografía instantánea del movimiento del edificio con respecto al nivel 5 de la cara norte. Note que todos los cocientes espectrales o admitancia con respecto al nivel h5N son iguales a la unidad, sin embargo la magnitud del vector en la figura se muestra modulada por la fase de la admitancia para lograr el efecto de la fotografía instantánea.

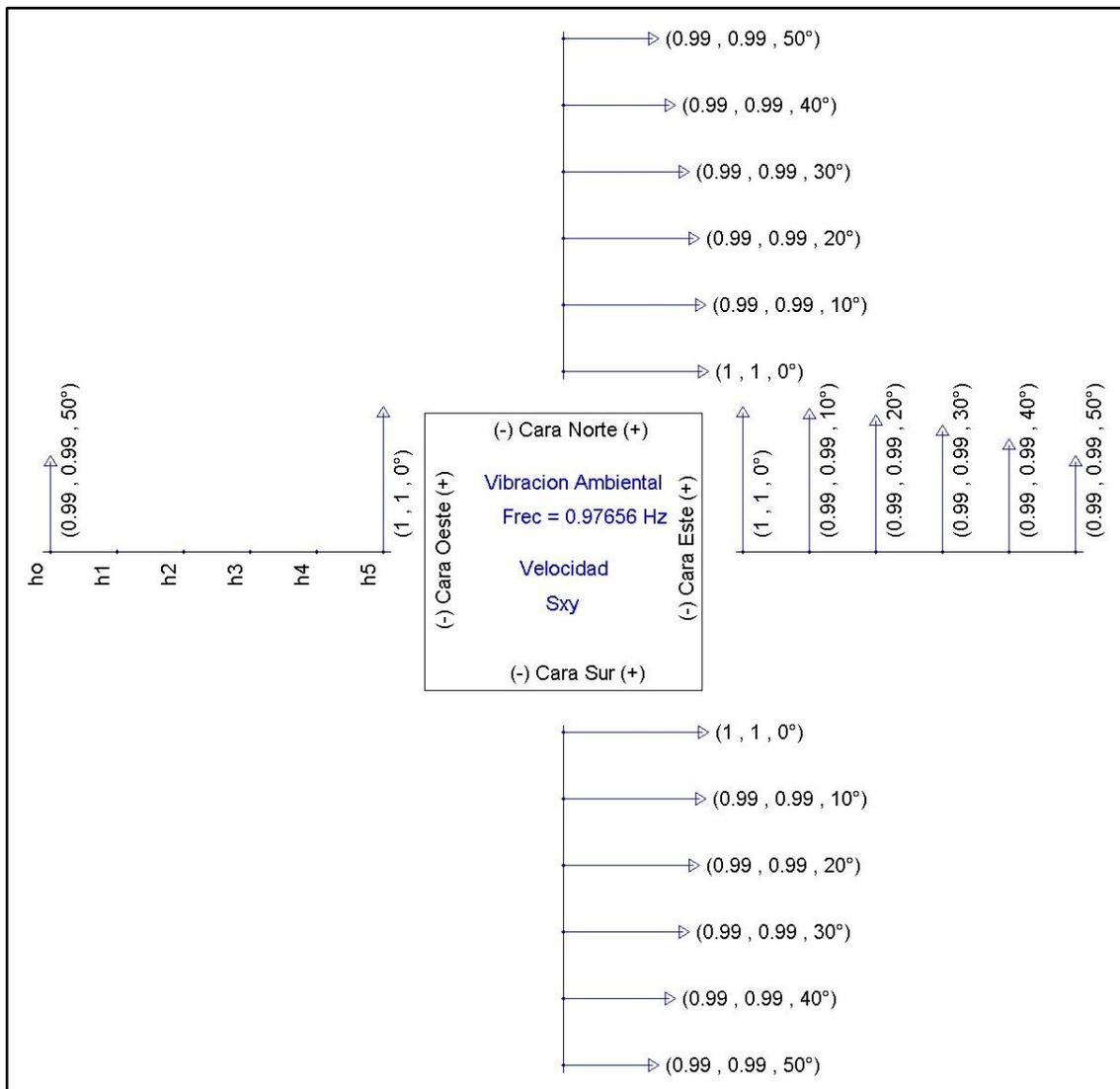


Figura 19. Vista de planta de la azotea del edificio-prueba. La respuesta para la frecuencia de 0.97 Hz, se indica con los vectores de velocidad relativa correspondientes a las cuatro caras del edificio para cada uno de los 5 niveles ( $h_0$ - $h_5$ ). Los números que se encuentran entre paréntesis (de izquierda a derecha) indican la admitancia, coherencia y fase con respecto al nivel  $h_5N$ .

En este experimento con datos sintéticos, se puede apreciar cualitativamente que existen dos modos traslacionales: uno, en la dirección Norte-Sur y otro, en la dirección Este-Oeste, y que ambos muestran la progresión de fase descrita en la Tabla 4.

### 2.3. Identificación de frecuencias características y formas modales empleando la Descomposición en Valores Singulares (DVS)

En esta sección se mencionan los conceptos básicos de la forma como se empleará la descomposición en valores singulares (DVS) en el análisis de los sismogramas, ya sea de vibración ambiental o forzada, con la finalidad de identificar las formas modales del edificio-prueba. Se construye la matriz “A” ordenando por columna a los sismogramas simultáneos obtenidos en cada una de las caras y niveles del edificio. En otras palabras, las filas de la matriz “A” representan al tiempo y sus columnas representan al espacio en donde se localizan los sensores de vibración; los sismogramas de cada cara y nivel se indican con las claves h5N, h4N ... como se indica en la Tabla I:

$$A(m \times n) = \begin{bmatrix} h5N & h4N & \dots & h5S \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}.$$

La descomposición en valores singulares permite la factorización de la matriz A en las matrices ortonormales U y V y en la matriz diagonal  $\Lambda$  (Strang, 1988):

$$A=U\Lambda V^T, \quad (5)$$

donde U representa a las Componentes Principales o eigenfunciones en el tiempo,  $\Lambda$  son los valores singulares y V representa a los eigenvectores en el espacio definido por las columnas de A.

Reordenando a la ecuación (5), se obtiene una expresión útil para interpretar a esta descomposición:

$$AV=U\Lambda = \left[ \lambda_1 \begin{bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \\ u_3^1 \\ \vdots \\ u_m^1 \end{bmatrix} \quad \lambda_2 \begin{bmatrix} u_1^2 \\ u_2^2 \\ u_3^2 \\ \vdots \\ u_m^2 \end{bmatrix} \quad \dots \quad \lambda_n \begin{bmatrix} u_1^n \\ u_2^n \\ u_3^n \\ \vdots \\ u_m^n \end{bmatrix} \right]. \quad (6)$$

La ecuación (6) representa a la proyección de A en el espacio definido por los eigenvectores V.

En analogía con el espectro de Fourier, la ecuación (6) es la representación espectral de A, es decir, cada una de las columnas de U es una función-base empíricamente ortogonal cuya magnitud está dada por el valor singular correspondiente. A las columnas de U se les conoce también en la literatura como “Componentes Principales”. La amplitud y la fase de cada “Componente Principal” en cada una de las localidades o niveles del edificio, está modulada por los elementos del eigenvector V correspondiente. En el Apéndice B se justifica el uso de esta metodología y se describe en detalle la relación entre la Descomposición en Valores Característicos y la Descomposición en Valores Singulares para obtener las Componentes Principales, mismas que a su vez contienen a los modos normales de vibración del edificio.

Este método se aplicará en la sección 3.2.2 para determinar las frecuencias características y formas modales del edificio-prueba.

### **3. Análisis del edificio-prueba sin daño**

#### **3.1. Identificación de las frecuencias características**

En general, la observación de los espectros resultantes de las diferentes pruebas de vibración (Figura 20-23), 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 (Figura 20a y 21a), y otra de 8Hz, en las caras norte y sur que se observa tanto en las pruebas de vibración ambiental como forzada (Figura 20a,b y 21a,b).

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 contraste, en el espectro de vibración forzada no se observa un pico espectral pronunciado en 6.79 Hz, posiblemente porque las vibraciones forzadas se generaron con una mesa vibratoria localizada al Sur del edificio-prueba, lo que explicaría que estas vibraciones no activaran un modo en la dirección Este-Oeste. Tampoco observamos este pico espectral en el registro del sismo.

En cuanto al pico espectral en la frecuencia de 8Hz, aunque de muy poca amplitud, indica la posibilidad de una forma modal en la dirección Este-Oeste.

Un espectro de vibración forzada consume más tiempo y recursos que un espectro de vibración ambiental. Sin embargo, el experimento cumplió ampliamente su objetivo porque demuestra que los registros de vibración ambiental son suficientes para identificar las frecuencias características de un edificio.

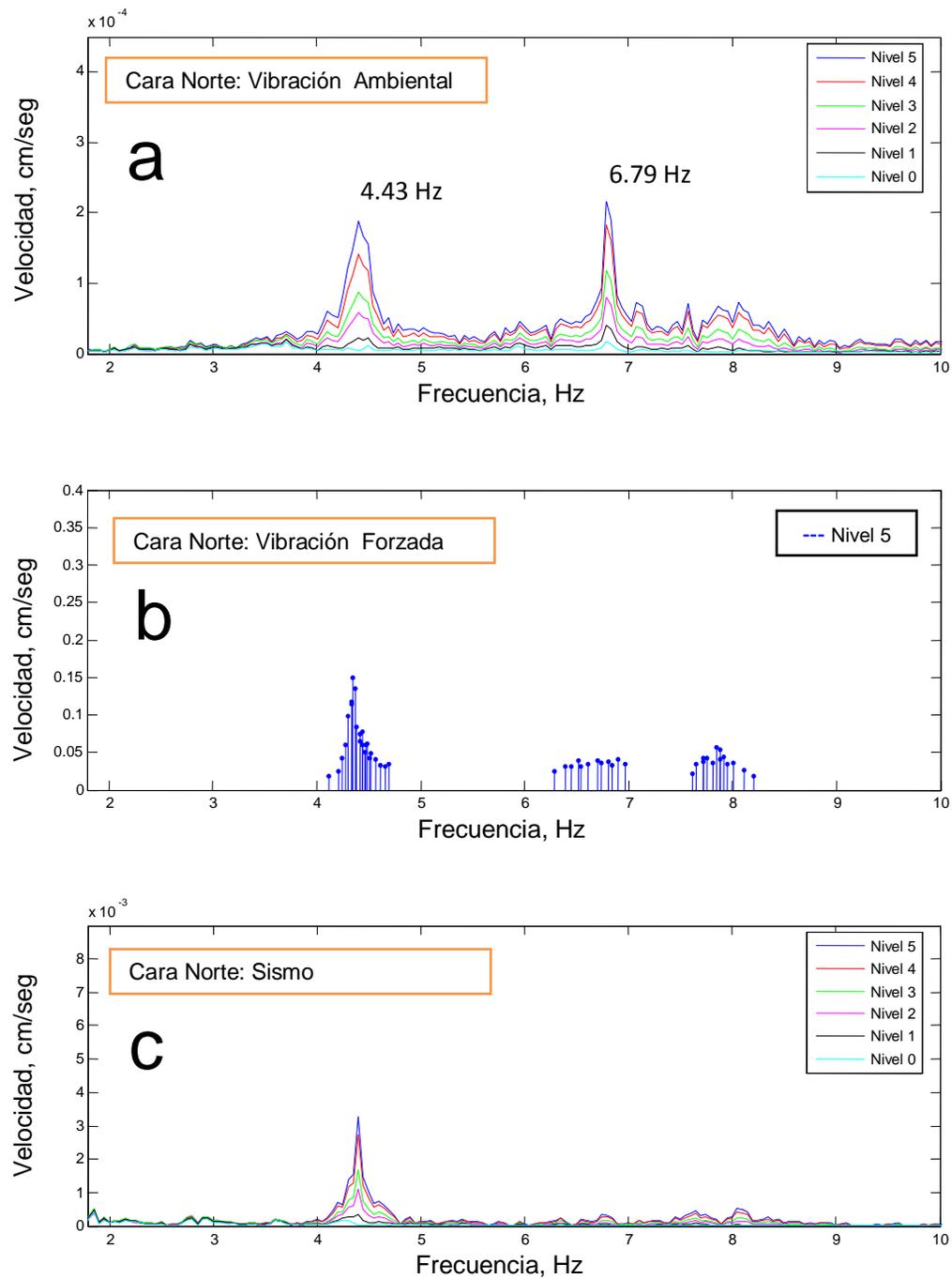


Figura 20. Cara Norte: componente horizontal en la dirección E-O. Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad en los diferentes niveles de la cara Norte del edificio-prueba sin daño obtenidos a partir de: **a.** vibración ambiental; **b.** vibración forzada, y **c.** sismo.

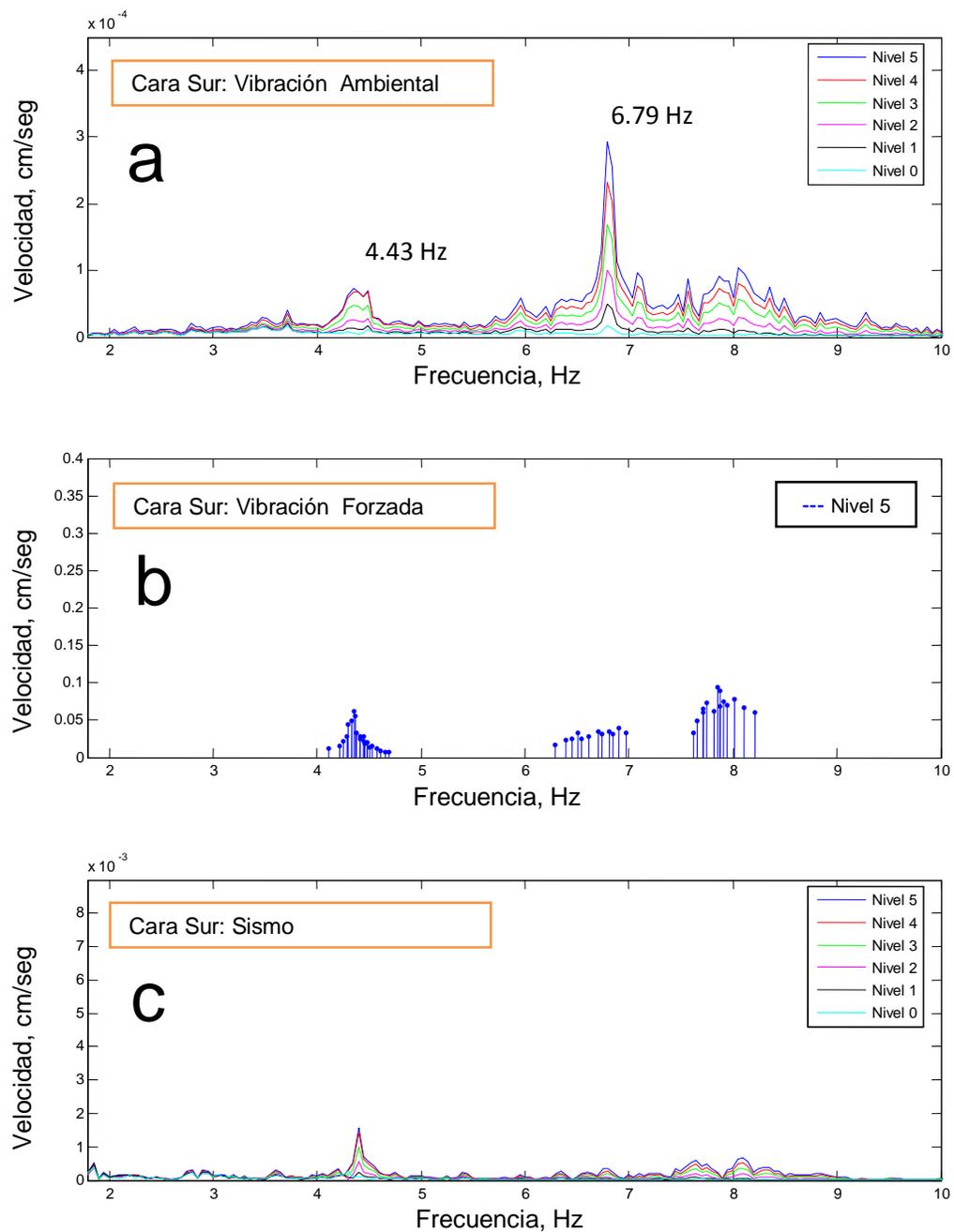


Figura 21. Cara Sur: componente horizontal en la dirección E-O. Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad en los diferentes niveles de la cara Sur del edificio-prueba sin daño obtenidos a partir de: **a.** vibración ambiental; **b.** vibración forzada, y **c.** sismo.

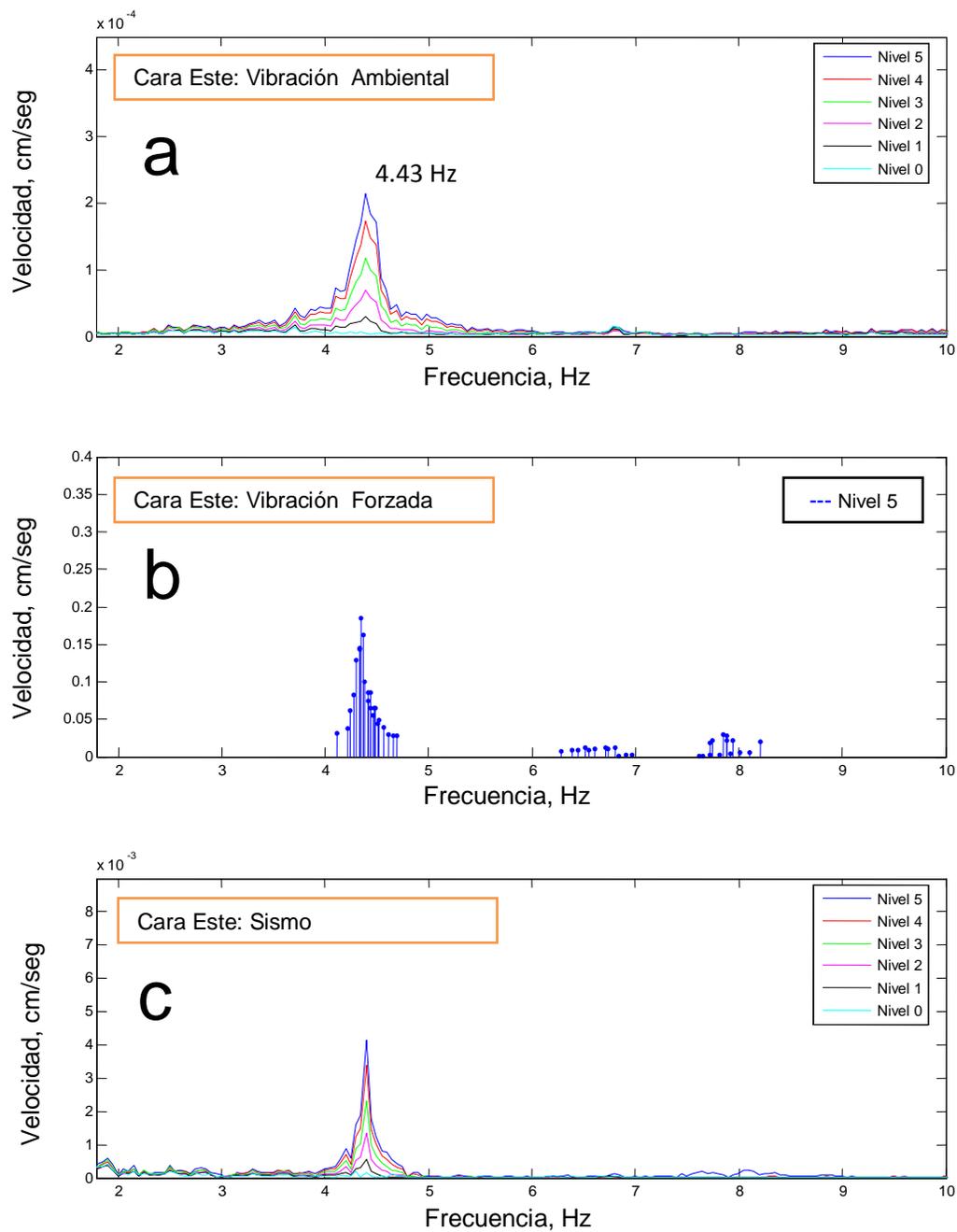


Figura 22. Cara Este: componente horizontal en la dirección N-S. Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad en los diferentes niveles de la cara Este del edificio-prueba sin daño obtenidos a partir de: **a.** vibración ambiental; **b.** vibración forzada, y **c.** sismo.

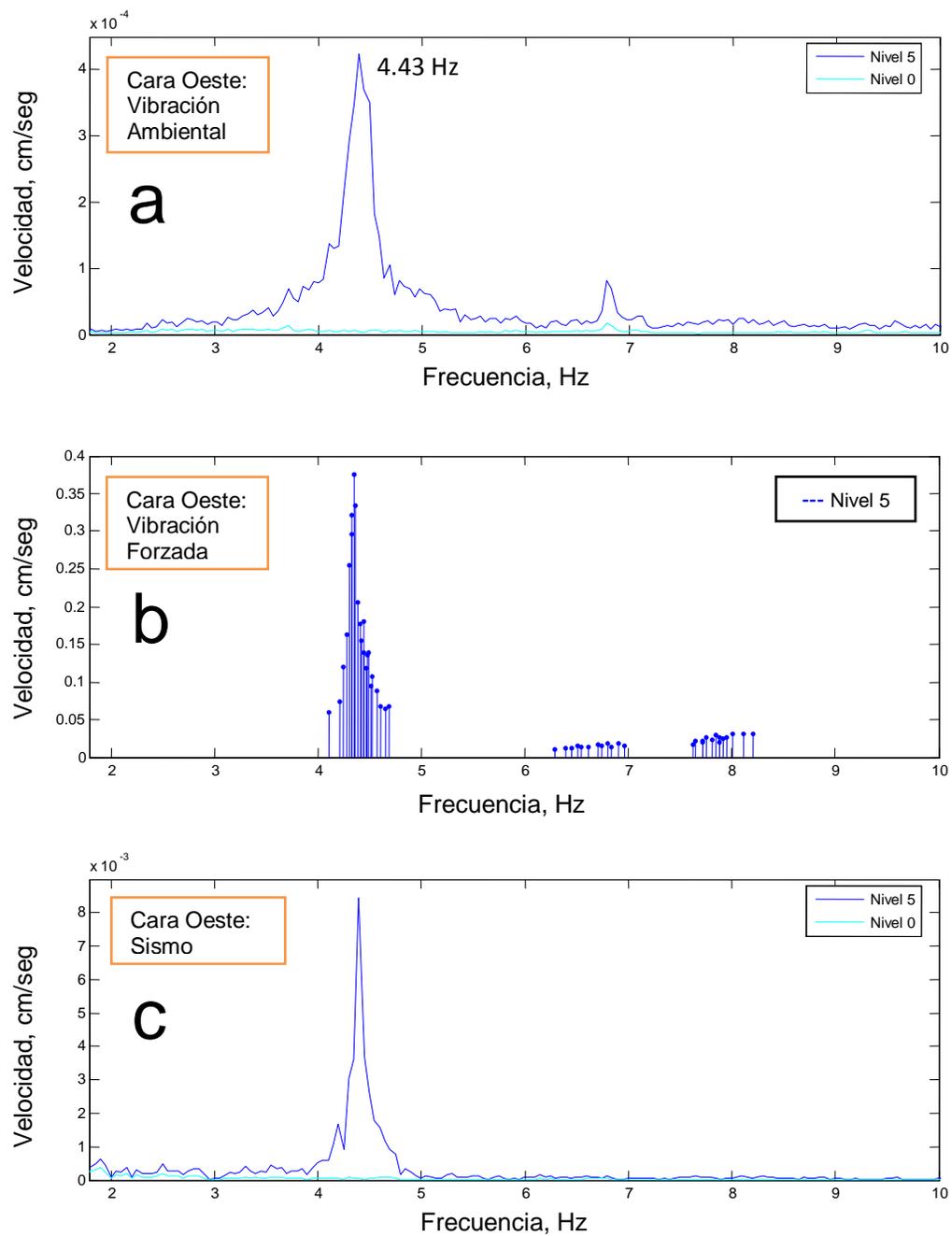


Figura 23. Cara Oeste: componente horizontal en la dirección N-S. Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad en los diferentes niveles de la cara Oeste del edificio-prueba sin daño obtenidos a partir de: **a.** vibración ambiental; **b.** vibración forzada, y **c.** sismo.

### **3.2. Identificación de formas modales del edificio-prueba sin daño**

#### **3.2.1. Respuesta en el dominio de la frecuencia**

Para identificar con mayor facilidad las formas modales correspondientes a las frecuencias características de 4.43 Hz, 6.79 Hz y 8Hz, se calcularon los espectros de respuesta de las pruebas de vibración ambiental y vibración forzada.

Los espectros de respuesta para la frecuencia de 4.43 Hz, obtenidos con vibración ambiental (Figura 24), y vibración forzada (Figura 25), son prácticamente iguales. Ambas figuras muestran cualitativamente dos formas modales: un modo dominante traslacional en la dirección Norte-Sur y un modo torsional.

En la frecuencia de 6.79 Hz, ambos espectros, el de vibración ambiental (Figura 26), y el de vibración forzada (Figura 27), corroboran al modo traslacional dominante en la dirección Este-Oeste que se menciona en la sección 3.1, lo que evidencia la utilidad de los espectros de respuesta para identificar formas modales.

En la frecuencia de 8 Hz se corrobora la existencia un modo traslacional en la dirección Este-Oeste, tanto en la prueba de vibración ambiental (Figura 28) como en la prueba de vibración forzada (Figura 29).

Cabe destacar que 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 8Hz, indica la persistencia en las formas modales del edificio.

Note que 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 todos los niveles del edificio, incluyendo al nivel cero en todas las caras se debe a la naturaleza monocromática de la vibración forzada.

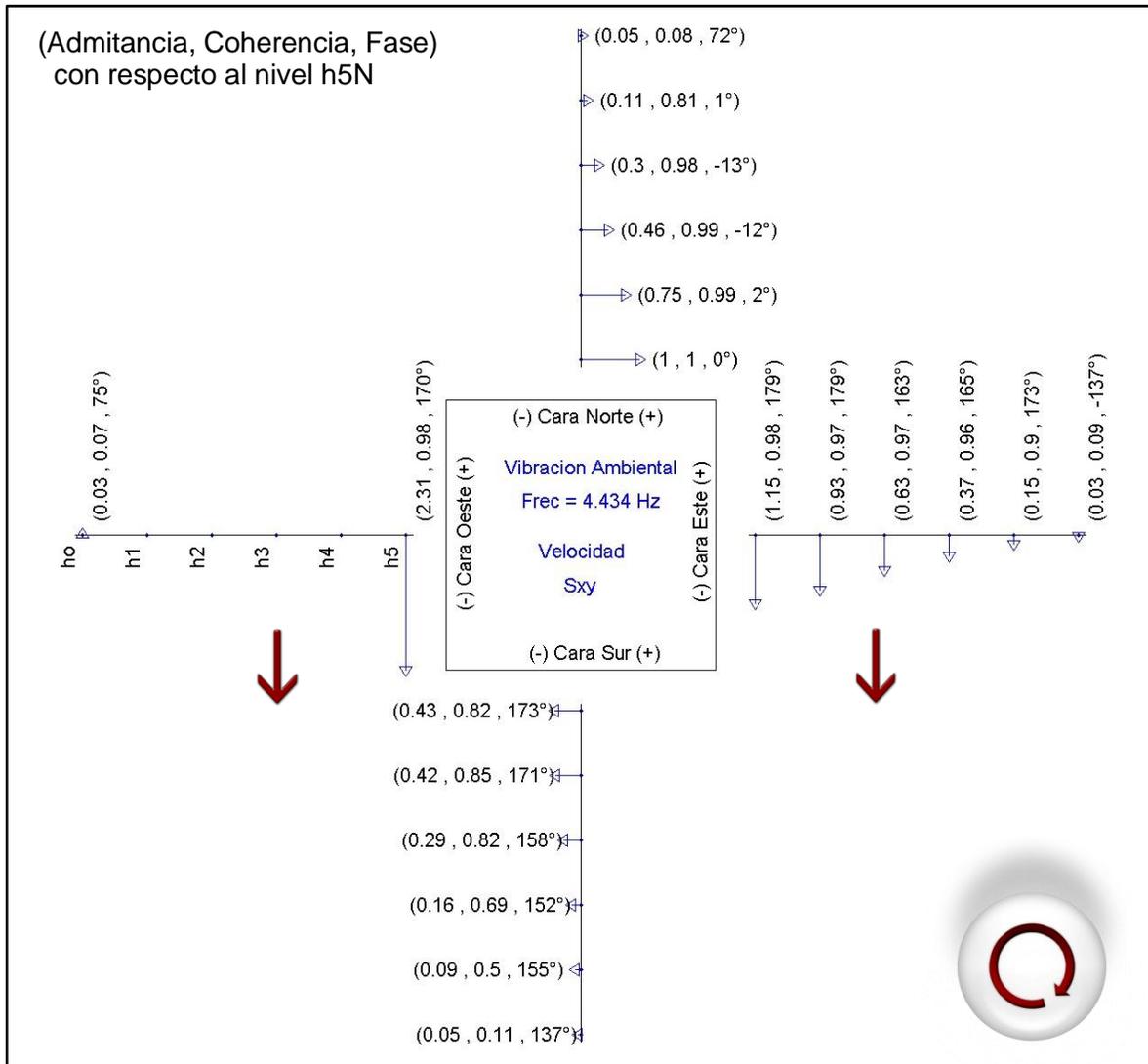


Figura 24. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración ambiental a 4.43 Hz. Modo traslacional dominante en la dirección Norte-Sur y modo torsional.

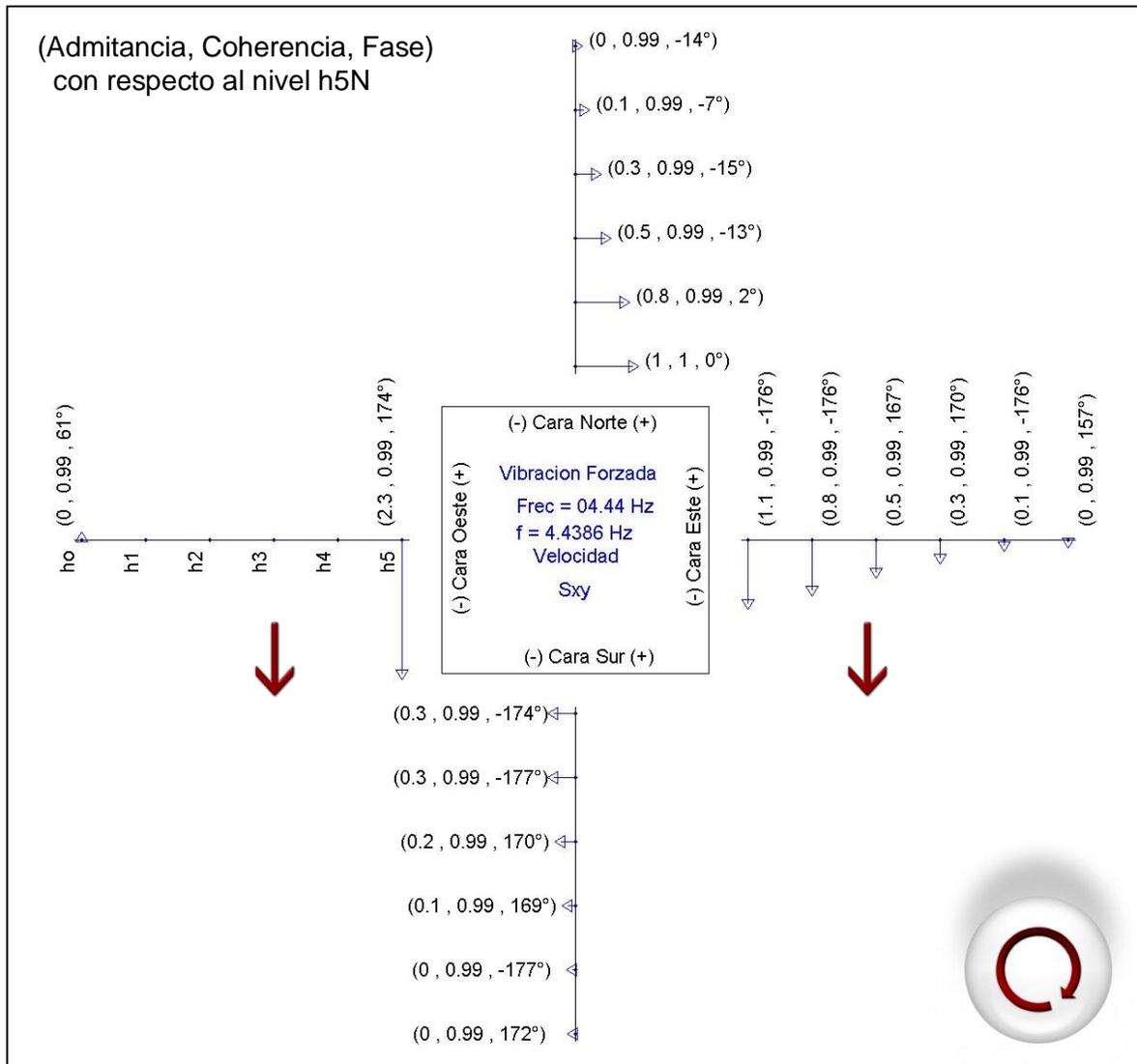


Figura 25. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración forzada a 4.43 Hz. Modo traslacional dominante en la dirección Norte-Sur y modo torsional.

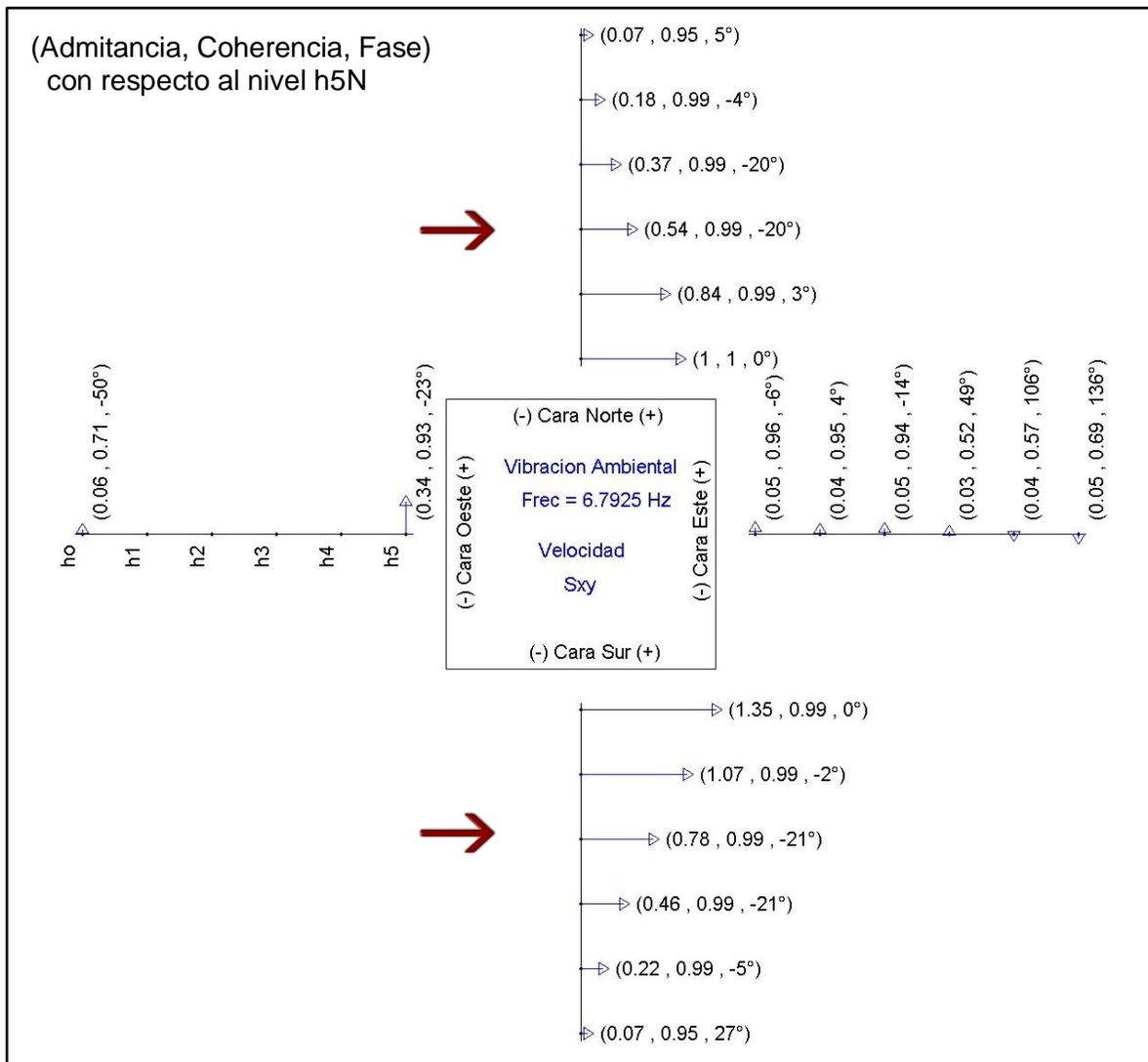


Figura 26. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración ambiental a 6.79 Hz.

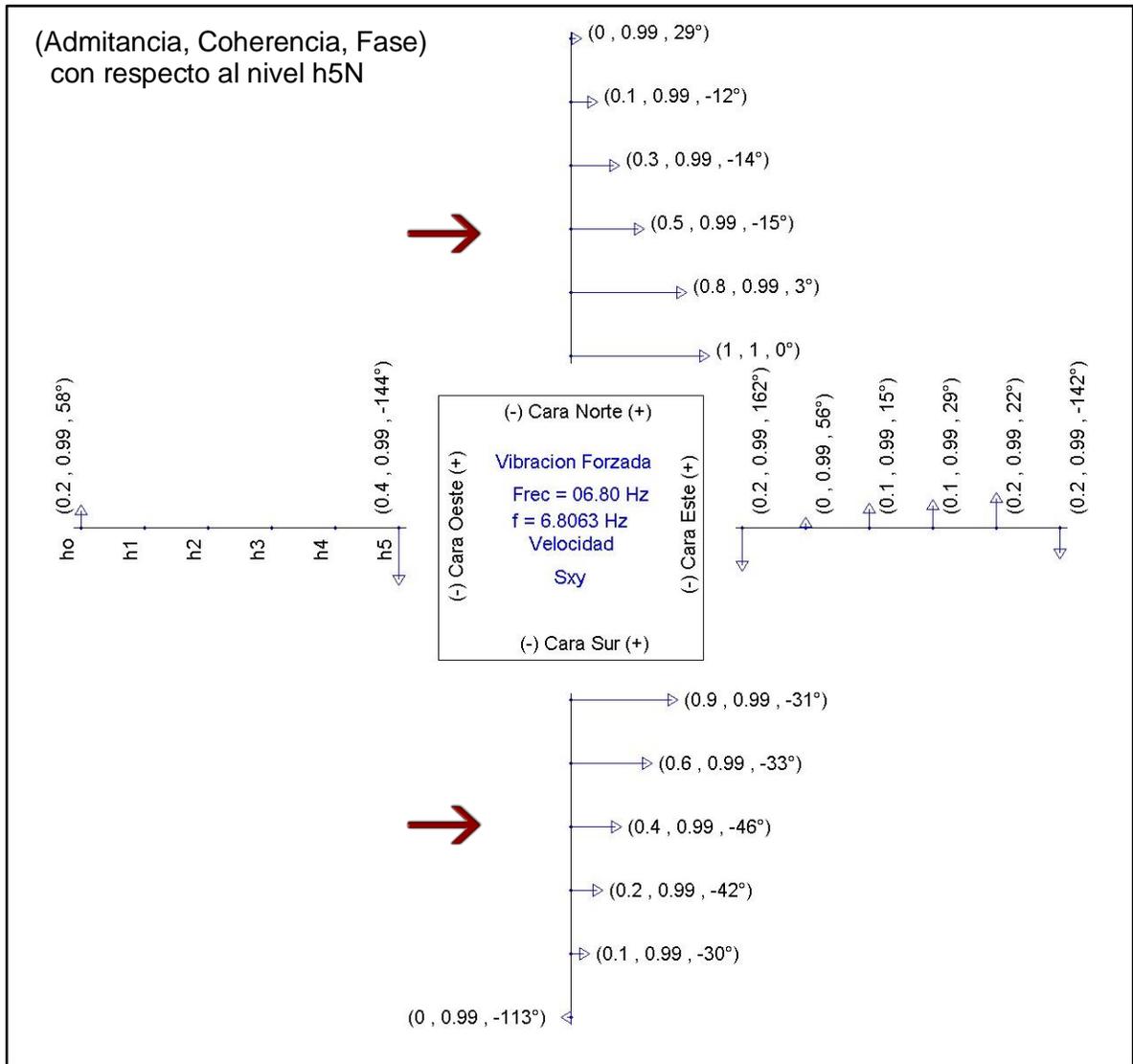


Figura 27. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración forzada a 6.80 Hz.

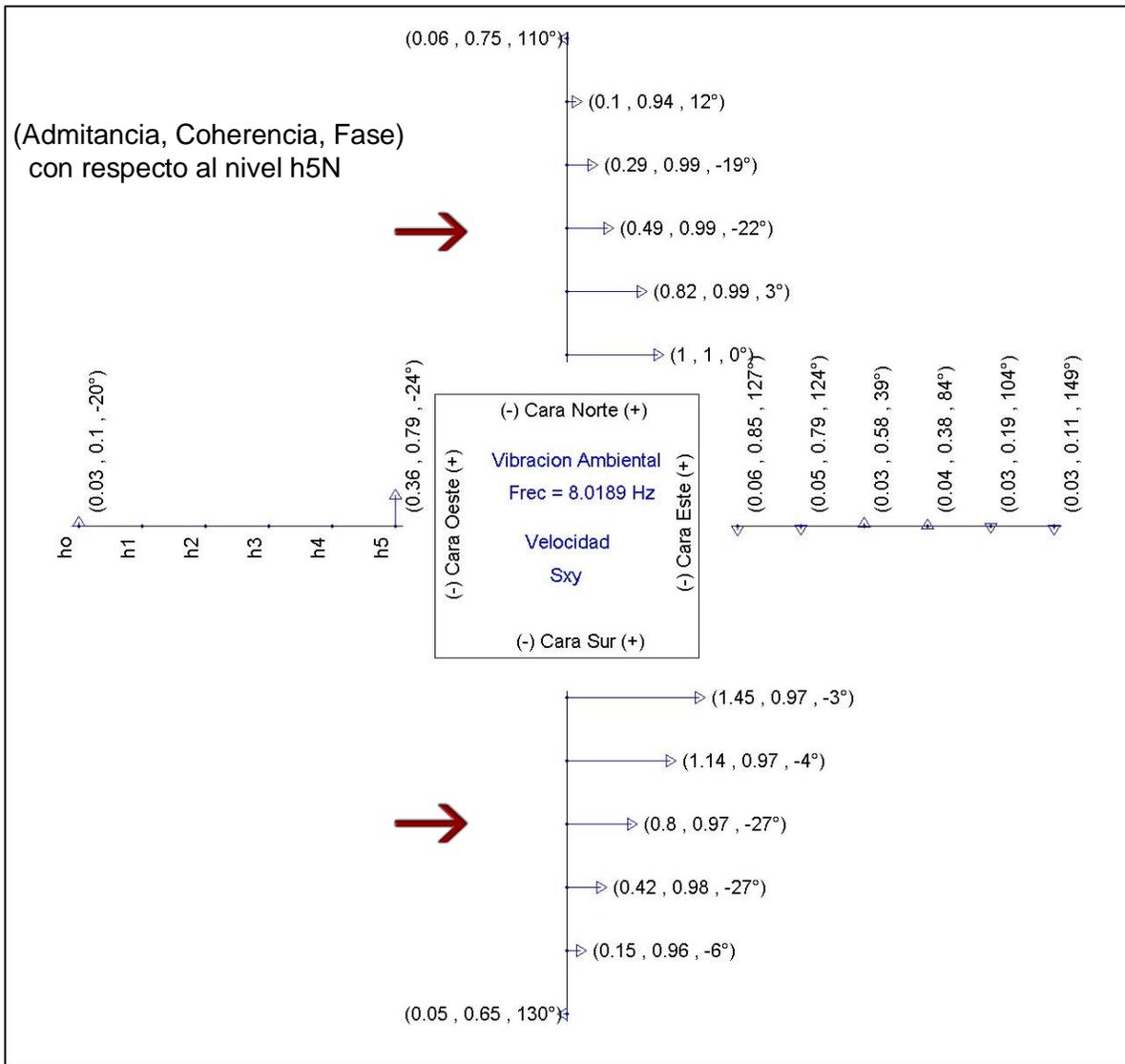


Figura 28. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración ambiental a 8.0 Hz.

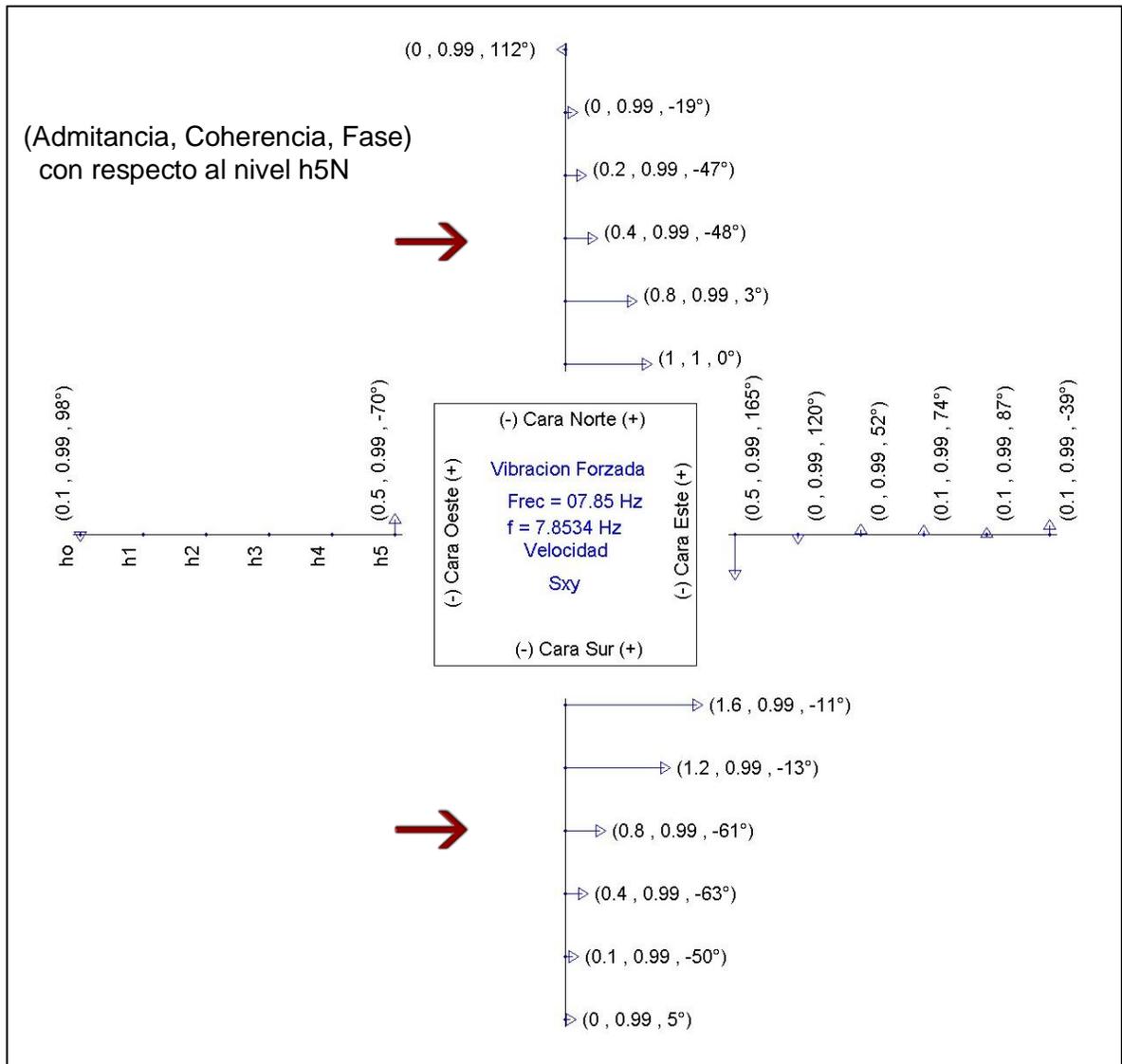


Figura 29. Respuesta del edificio-prueba sin daño para la componente espectral de vibración forzada a 7.85 Hz.

### 3.2.2. Descomposición en Valores Singulares (DVS) en el edificio-prueba sin daño

Para obtener las formas modales del edificio-prueba empleando el método de Descomposición en Valores Singulares, se construyó la matriz "A" con las observaciones de vibración ambiental como se indica en la sección (2.5).

Los valores singulares de "A" permiten identificar con facilidad las Componentes Principales y la importancia relativa de cada una de ellas. En este caso y como se indica en la Figura 30, las dos primeras Componentes Principales representan el 99% de la varianza total de las observaciones de vibración ambiental.

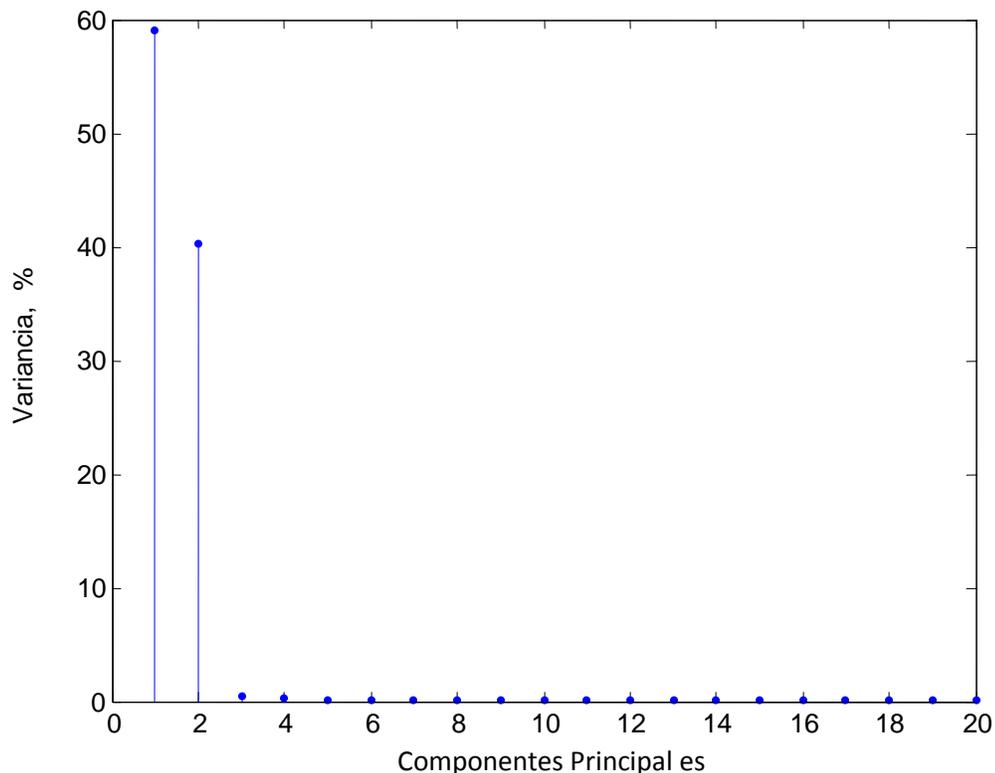


Figura 30. Variancia porcentual de cada una de las Componentes Principales de la matriz "A".

En lugar de analizar el espectro de Fourier de las observaciones de vibración ambiental de cada una de las caras y niveles del edificio, los resultados de la DVS indican que es suficiente con analizar el espectro de Fourier de las dos primeras Componentes Principales para identificar las frecuencias características del edificio. Como se indica en la Figura 31, la primera Componente tiene un pico espectral en la frecuencia de 4.43 Hz, y la segunda tiene un pico espectral en 6.79 Hz.

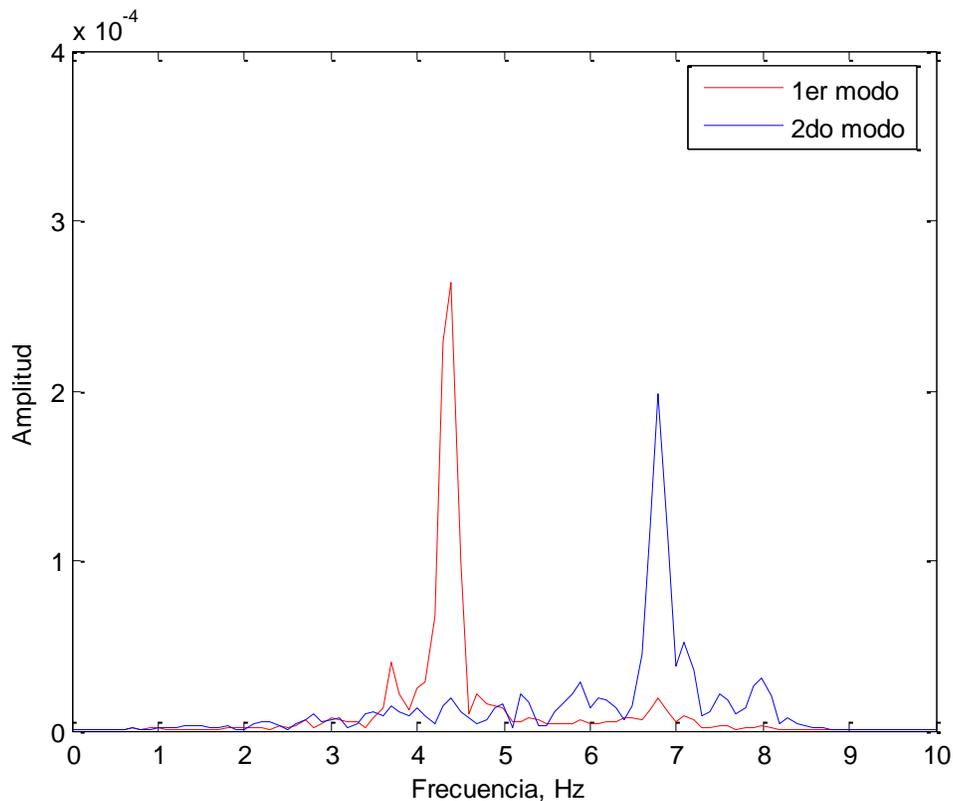


Figura 31. Espectro de las dos primeras Componentes Principales de la matriz A que a su vez corresponden a los dos primeros modos del edificio-prueba.

La amplitud relativa de cada una de las Componentes Principales, en cada una de las caras y niveles del edificio, se encuentra en los eigenvectores correspondientes de la matriz V. En las Figuras 32 y 33 se muestra la amplitud relativa de las dos primeras Componentes Principales de la matriz A, mismas que

a su vez representan a dos de los modos normales del edificio-prueba resultantes de aplicar el método de DVS a 14 segmentos o ventanas de tiempo en las que se subdividieron las observaciones de vibración ambiental. La admitancia, coherencia y fase que se indica en las figuras, se calcularon empleando los mismos conceptos (cocientes de amplitud y diferencias de fase) que en la sección (2.2).

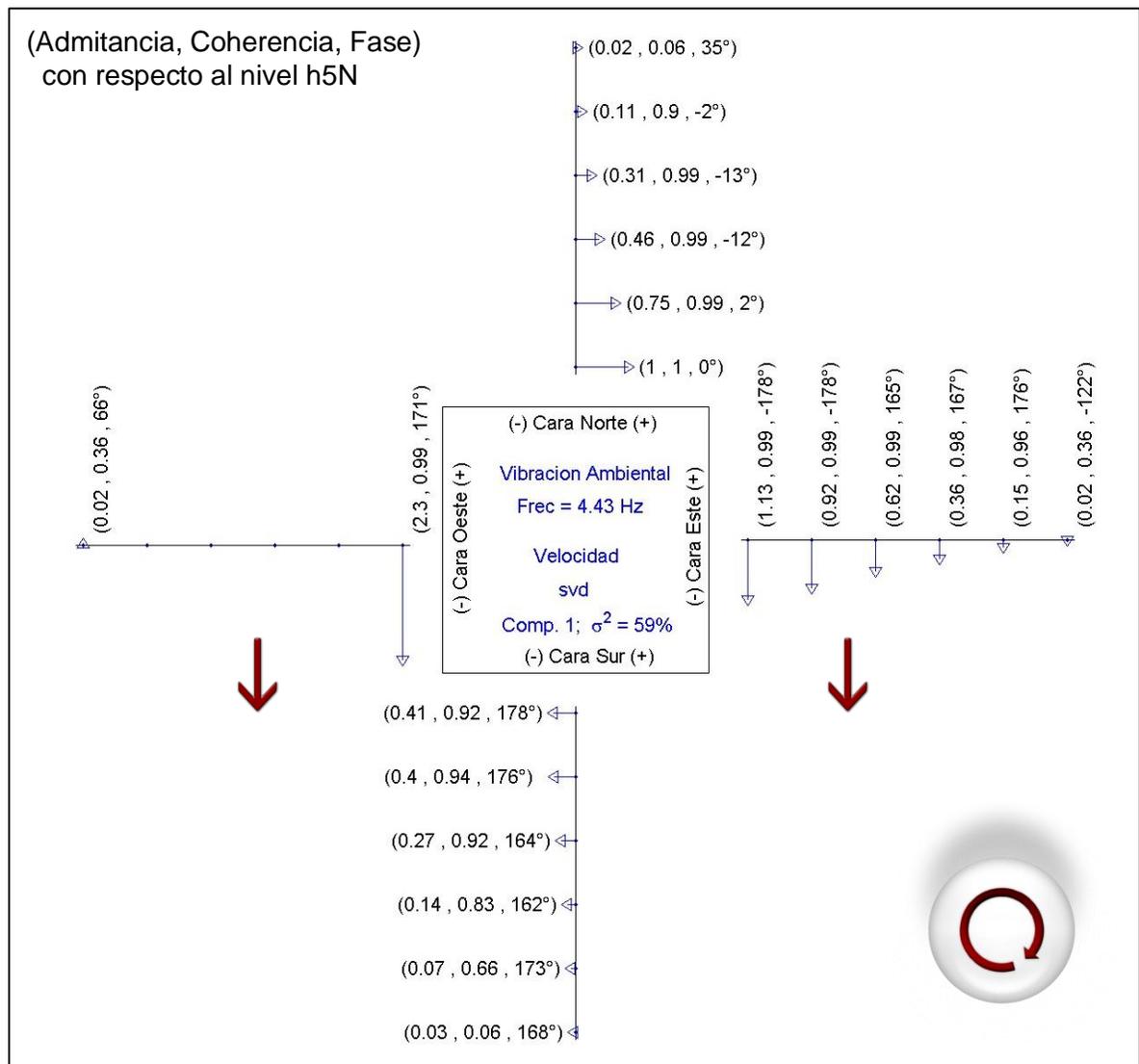


Figura 32. Forma modal del edificio-prueba sin daño correspondiente a la primera Componente Principal resultante de la DVS. Los eigenvectores que se indican en la figura se normalizaron con el eigenvector del nivel h5N.

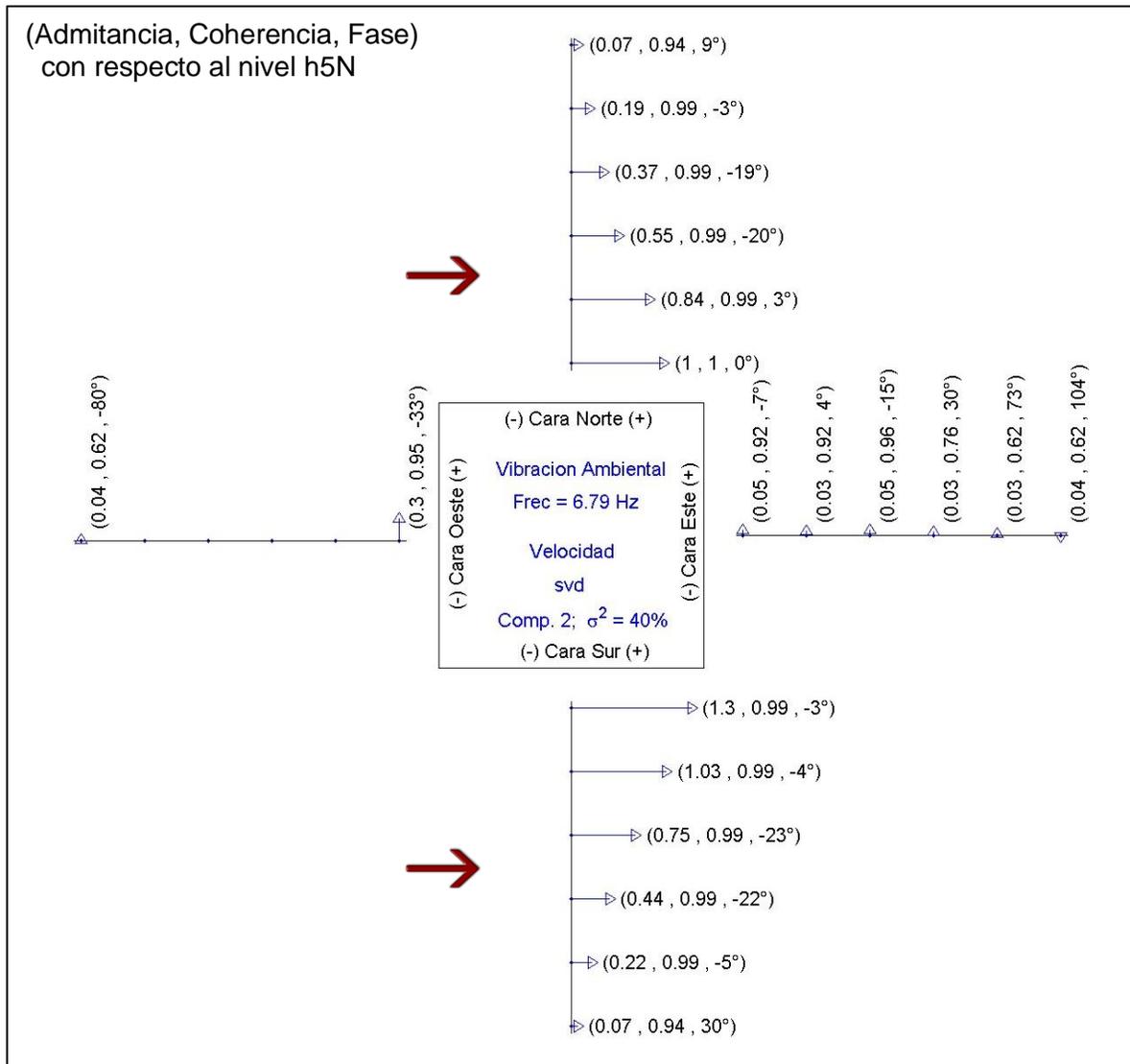


Figura 33. Forma modal del edificio-prueba sin daño correspondiente a la segunda Componente Principal resultante de la DVS. Los eigenvectores que se indican en la figura se normalizaron con el eigenvector del nivel h5N.

Las dos formas modales del edificio-prueba obtenidas con el método DVS son prácticamente iguales a las obtenidas con los espectros de respuesta (Figura 24 a 29 de la sección 3.2.1). En resumen, el método de DVS resulta adecuado para obtener y describir las principales formas modales del edificio-prueba.

### **3.3. Separación de la torsión de la traslación en el edificio-prueba sin daño**

Los análisis anteriores son útiles para la identificación de las formas modales de una estructura. Sin embargo, es necesario separar cuantitativamente las formas modales cuando existe una respuesta acoplada de torsión y traslación en la misma frecuencia. Por ejemplo, la respuesta del edificio-prueba (Figura 32), muestra cualitativamente un acoplamiento de torsión y traslación en la misma frecuencia de 4.43 Hz.

Para separar la torsión de la traslación, se hace la hipótesis de que el movimiento de torsión tiene un desfase de 180 grados en las caras opuestas del edificio (Luco, 2009; método heurístico, comunicación personal). La suma de las velocidades paralelas a estas caras, en las caras opuestas del edificio, minimiza la torsión y revela la traslación, mientras que la resta de estas velocidades revela a la torsión.

Al sumar las observaciones de vibración ambiental en el dominio del tiempo, en las caras opuestas norte y sur del edificio-prueba, en todos sus niveles, resulta un pico espectral dominante en la frecuencia de 6.79 Hz (Figura 34a); esto indica que sólo existe un modo traslacional en la dirección Este-Oeste. Al restar las mismas velocidades, resulta un modo torsional dominante en la frecuencia de 4.43 Hz (Figura 34b).

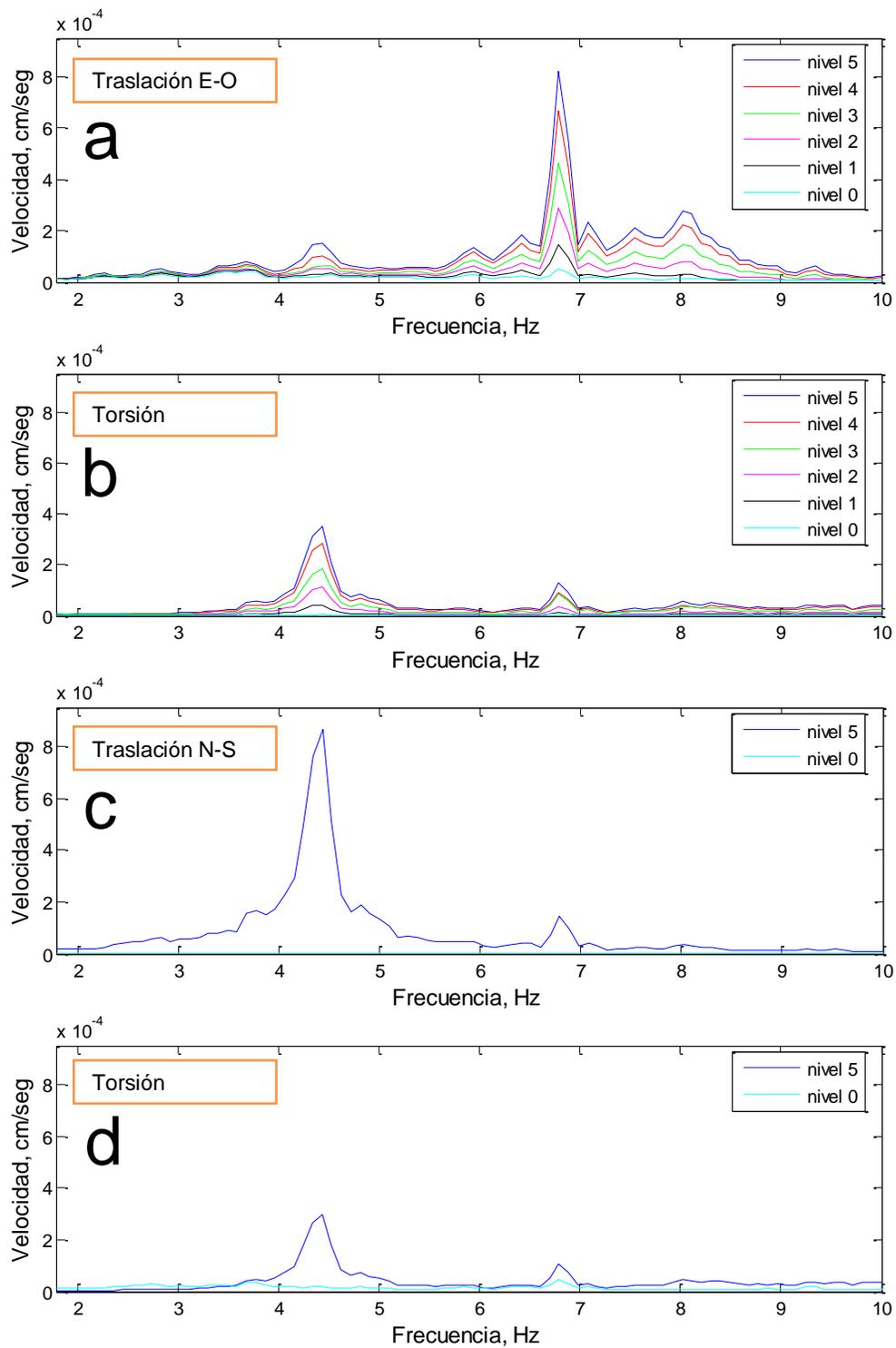


Figura 34. **a.** Traslación en la dirección Este-Oeste del edificio-prueba sin daño. **b.** Torsión calculada con las caras Norte y Sur. **c.** Traslación en la dirección Norte-Sur. **d.** Torsión calculada con las caras Este y Oeste.

En las caras opuestas Este y Oeste del edificio-prueba, sólo coinciden las observaciones de vibración ambiental en los niveles 5 y 0 debido a que no se instrumentaron los niveles 1 a 4 de la cara Oeste. Al sumar las velocidades de las caras Este y Oeste, resulta un pico espectral dominante en la frecuencia de 4.43 Hz (Figura 34c), indicando que, además de la torsión que se observa en la misma frecuencia (Figura 34b), existe un modo traslacional en la dirección Norte-Sur de mayor amplitud que la torsión. Al restar las mismas velocidades, resulta un pico espectral en la frecuencia de 4.43 Hz (Figura 34d), corroborando el acoplamiento del modo torsional y traslacional en esta misma frecuencia. Cabe mencionar que es equivalente calcular la amplitud del modo torsional con las caras opuestas norte y sur que con las caras Este y Oeste.

El método para separar la torsión de la traslación confirma la existencia de las formas modales obtenidas con los espectros de respuesta y con el método DVS.

### **3.4. Modos verticales de la base del edificio-prueba sin daño**

#### **3.4.1. Balanceo (rocking)**

Los movimientos verticales de la base del edificio o formas modales de la base descritas en la Figura 12, deben estar acoplados con los modos horizontales torsionales y traslacionales. Por ejemplo, se espera que el modo traslacional horizontal en la dirección Norte-Sur en la frecuencia de 4.43 Hz produzca un balanceo de la base en la dirección Norte-Sur y que el modo traslacional horizontal en la dirección Este-Oeste en la frecuencia de 6.79 Hz produzca un balanceo de la base en la dirección Este-Oeste.

Para separar el balanceo en la dirección Norte-Sur, se hace la hipótesis de que el movimiento vertical en el lado norte de la base del edificio está desfasado 180 grados del movimiento vertical en el lado sur (Luco, 2009; comunicación personal). Consecuentemente, el balanceo en la dirección Norte-Sur se obtiene de la diferencia de las velocidades verticales en estas caras. Contrario a lo esperado, los resultados de vibración ambiental (Figura 35a) no muestran un pico espectral prominente en la frecuencia de 4.43 Hz; sin embargo, el pico espectral esperado aparece en los resultados de vibración forzada (Figura 35b) y durante el sismo (Figura 35c).

En contraste, los resultados de vibración ambiental para el balanceo Este-Oeste, sí muestran un pico espectral dominante en la frecuencia de 6.79 Hz (Figura 36a), mientras que, en la vibración forzada (Figura 36b) y durante el sismo (Figura 36c), el pico espectral esperado en la frecuencia de 6.79 Hz no está bien definido.

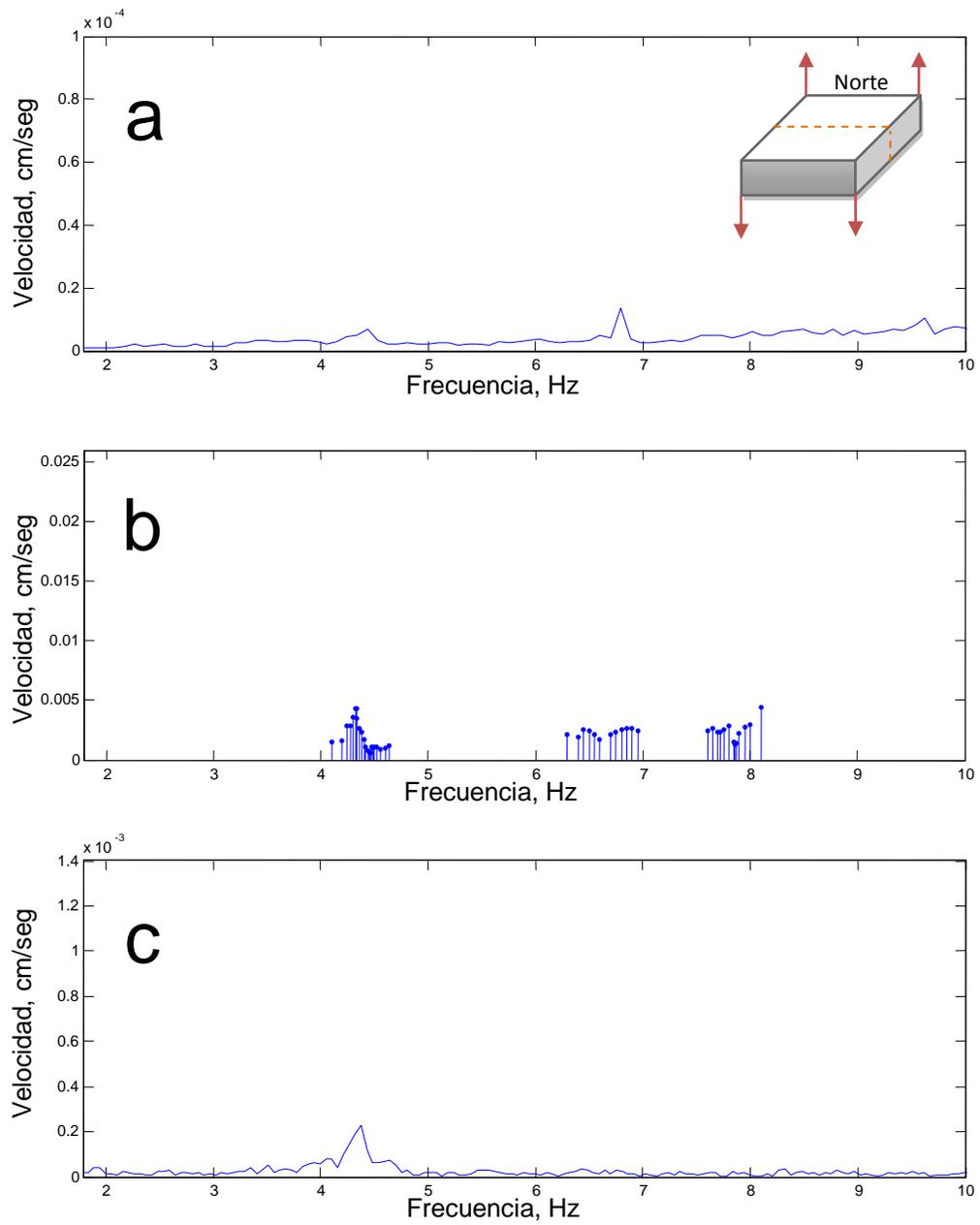


Figura 35. Balanceo de la base en la dirección Norte-Sur. **a.** vibración ambiental. **b.** vibración forzada. **c.** sismo.

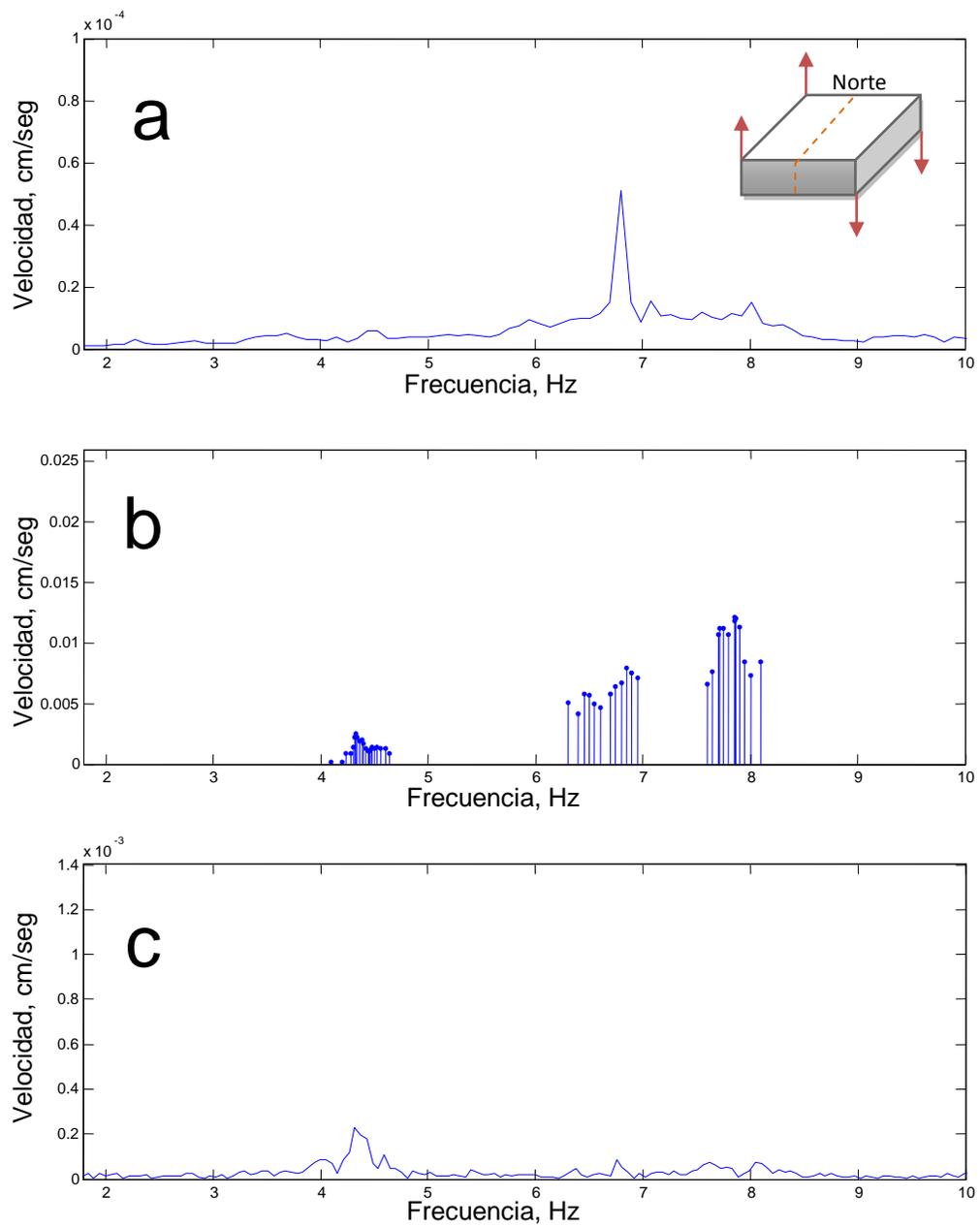


Figura 36. Balanceo de la base en la dirección Este-Oeste. **a.** vibración ambiental. **b.** vibración forzada. **c.** sismo.

Es importante mencionar que en estas pruebas de movimientos verticales, los resultados obtenidos de la vibración ambiental no son tan claros como en los resultados de vibración forzada o del sismo debido a que el sensor no logra sentir amplitudes tan pequeñas (Mendoza, 2010; comunicación personal).

El balanceo de la base en la dirección Este-Oeste para la frecuencia de 6.79 Hz es más evidente en la prueba de vibración ambiental y esto puede ser debido a la asimetría del edificio-prueba. La carga muerta en la cara este del edificio es mucho mayor que en la cara oeste debido a que esta cara no tiene pared en los cinco niveles.

El hecho de que no se observe una mayor amplitud en la dirección Este-Oeste para la frecuencia de 6.79 Hz durante el sismo puede ser un indicador de que las ondas sísmicas provienen de la dirección Norte-Sur.

### **3.4.2. Pandeo o torsión de la base (warping)**

Los modos horizontales torsionales en un edificio producen un pandeo de la base de la estructura. Para observar el pandeo de la base en el edificio-prueba se hace la hipótesis de que, en cuanto al movimiento vertical, las esquinas Noreste (NE) y Suroeste (SW), están desfasadas 180 grados de las esquinas Noroeste (NW) y Sureste (SE). La diferencia de las velocidades verticales entre estas esquinas permite observar el pandeo de la base (Luco, 2009; comunicación personal).

Los resultados de pandeo de la base en las pruebas tanto de vibración ambiental (Figura 37a) como de vibración forzada (Figura 37b) y durante el sismo (Figura 37c), corroboran la presencia de torsión de la base en el edificio-prueba en la misma frecuencia (4.43 Hz) que el modo torsional horizontal.

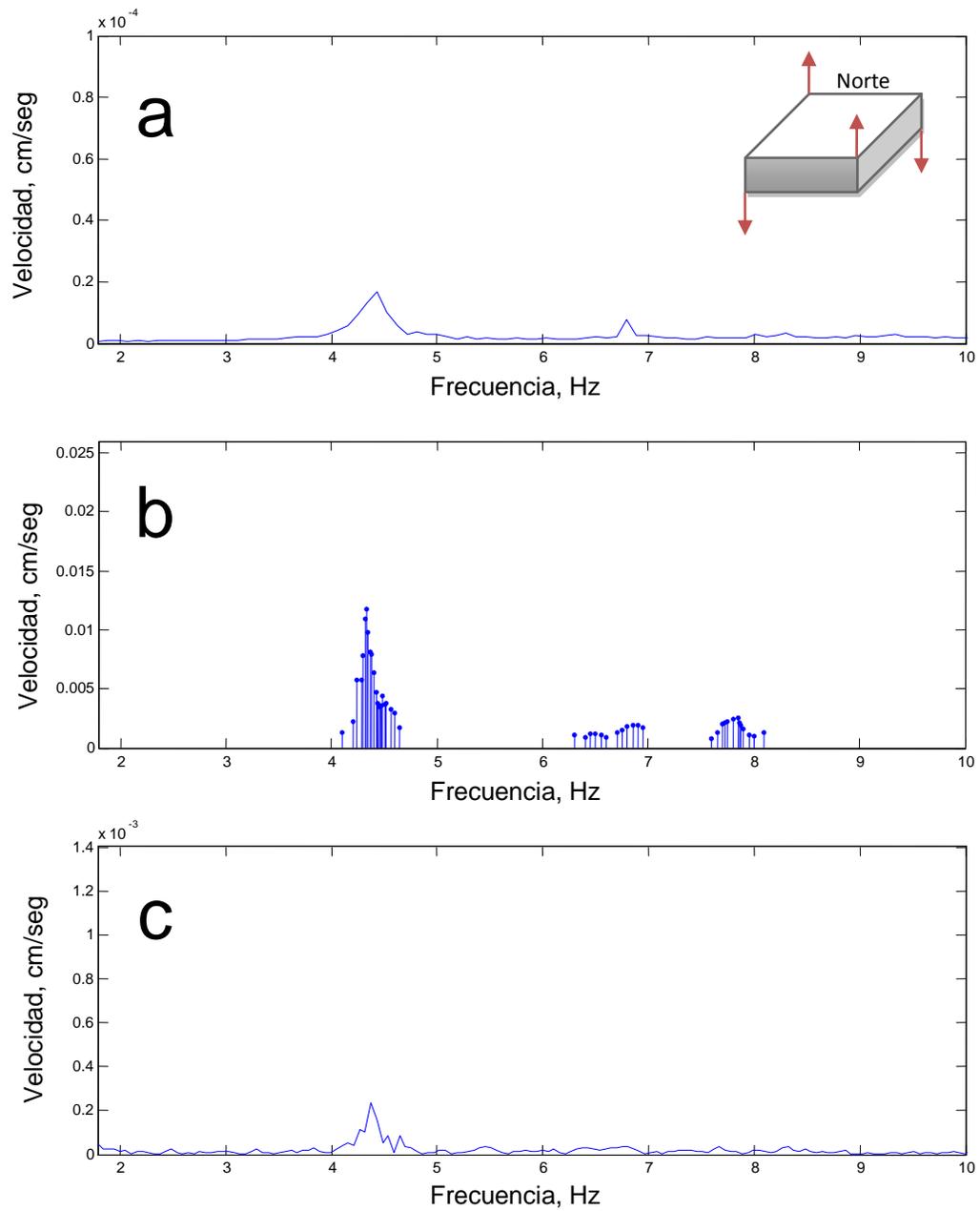


Figura 37. Pandeo de la base o torsión. **a.** vibración ambiental. **b.** vibración forzada. **c.** sismo.

## **4. Análisis del edificio-prueba con daño**

### **4.1. Identificación de las frecuencias características**

Una vez dañado el edificio-prueba, se obtuvieron datos de vibración ambiental y de vibración forzada para identificar y cuantificar los cambios en la respuesta del edificio en comparación con la respuesta del edificio sin daño o recién construido.

La prueba de vibración forzada se realizó para 42 frecuencias en los rangos de 1.9 Hz a 2.5 Hz, 4.8 Hz a 5.4 Hz y de 6.4 Hz a 7 Hz. Estas frecuencias fueron seleccionadas a partir de los resultados espectrales de la prueba de vibración ambiental.

Los espectros resultantes de las pruebas de vibración ambiental y vibración forzada para las cuatro caras del edificio-prueba se muestran respectivamente en las Figuras 38-41.

En general, la observación de los espectros resultantes de las diferentes pruebas permiten identificar tres frecuencias características: una de 2 Hz común a las cuatro caras del edificio, aunque la amplitud es más prominente en las caras este y oeste; una de 5Hz que sólo se observa en las caras norte y sur; y otra de 6.9 Hz que es común en las cuatro caras. Todas las frecuencias aparecen tanto en la prueba de vibración ambiental como en la de vibración forzada.

Cabe mencionar que no se instrumentó la cara oeste del edificio durante la prueba de vibración forzada debido a la falta de sensores en ese momento.

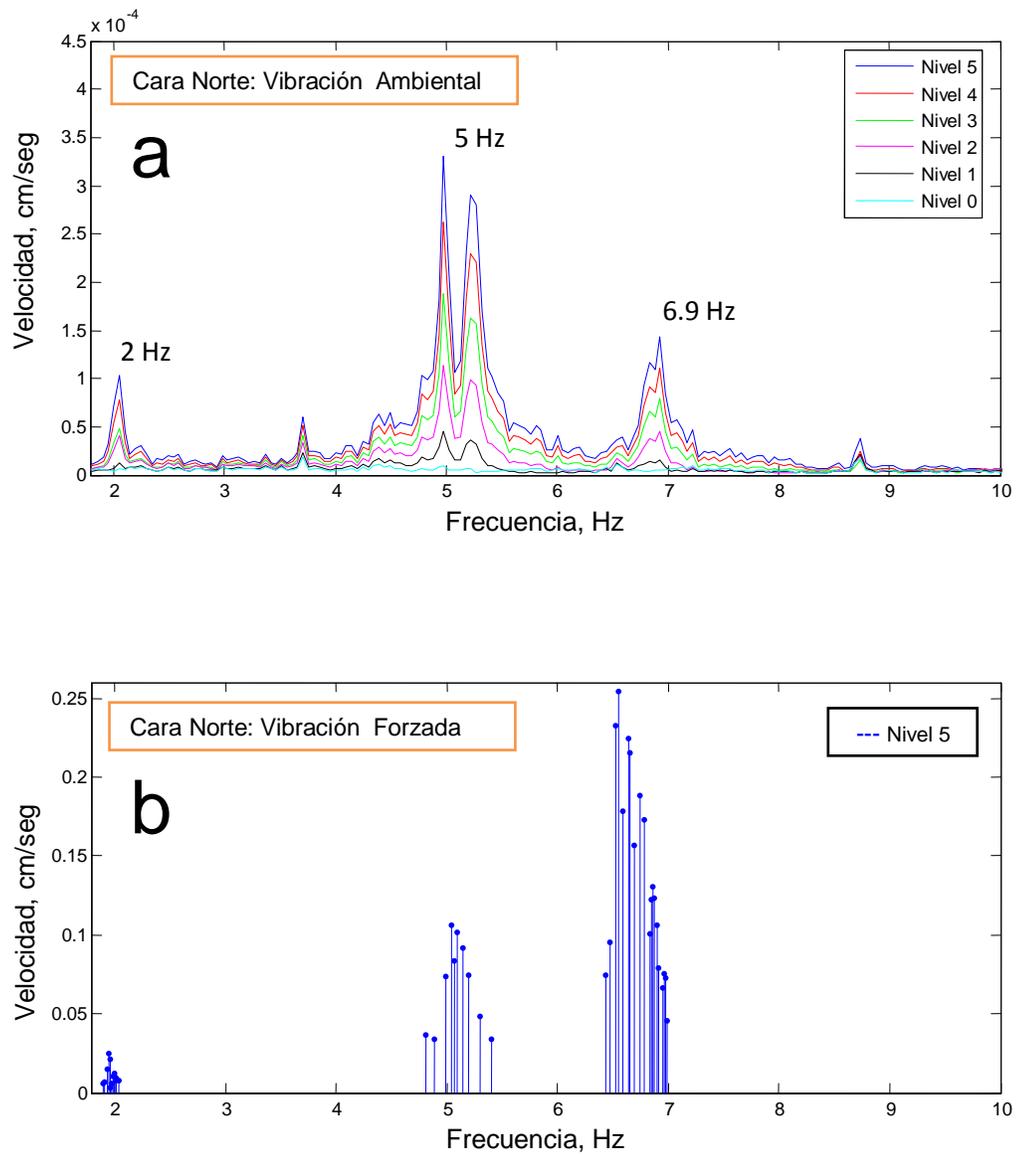


Figura 38. Cara Norte: Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad horizontal en la dirección E-O en los diferentes niveles de la cara norte del edificio-prueba con daño, obtenidos a partir de: **a.** vibración ambiental y **b.** vibración forzada.

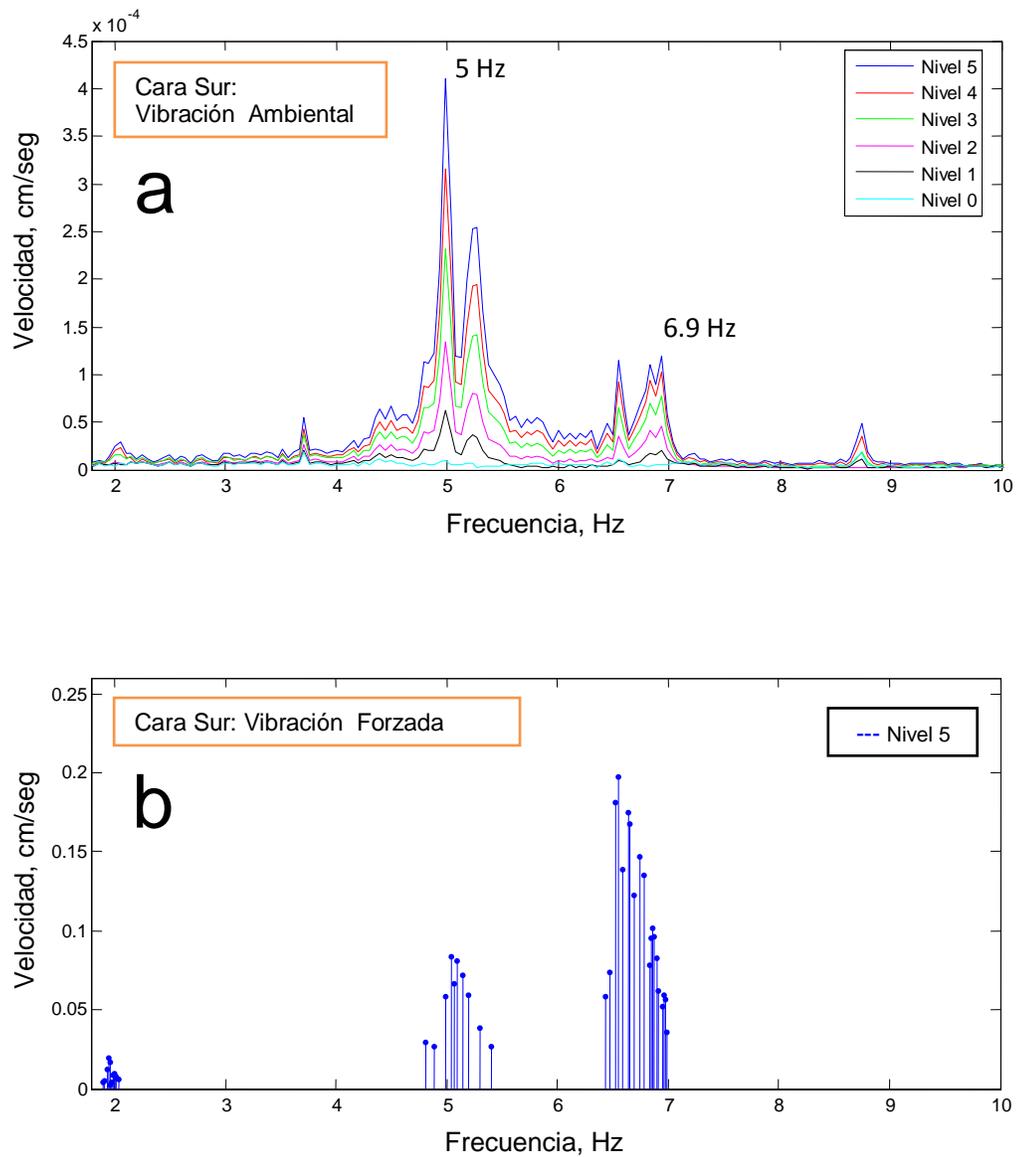


Figura 39. Cara Sur: Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad horizontal en la dirección E-O en los diferentes niveles de la cara sur del edificio-prueba con daño, obtenidos a partir de: **a.** vibración ambiental y **b.** vibración forzada.

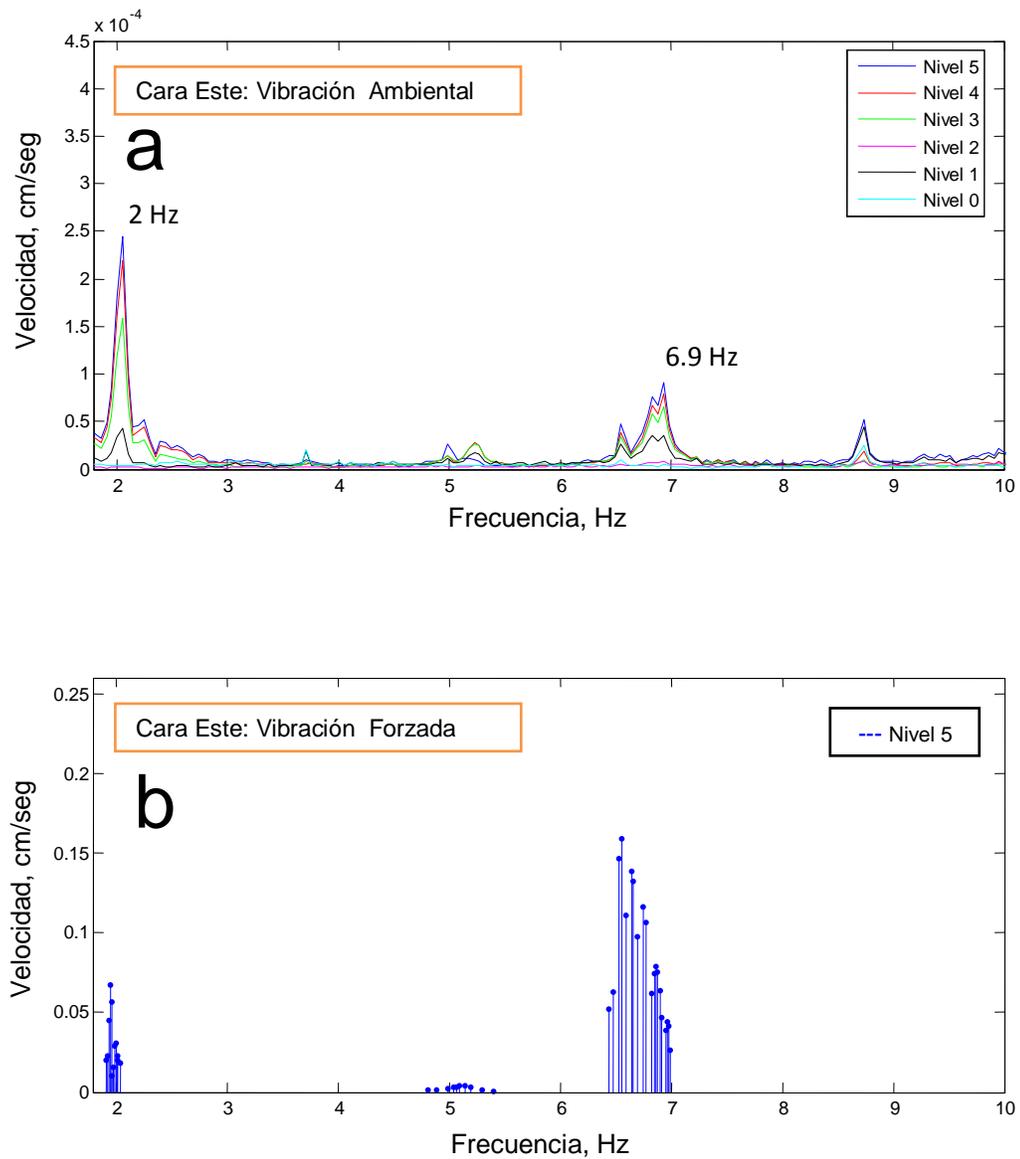


Figura 40. Cara Este: Espectros de amplitud de las observaciones de velocidad horizontal en la dirección N-S en los diferentes niveles de la cara este del edificio-prueba con daño, obtenidos a partir de: **a.** vibración ambiental y **b.** vibración forzada.

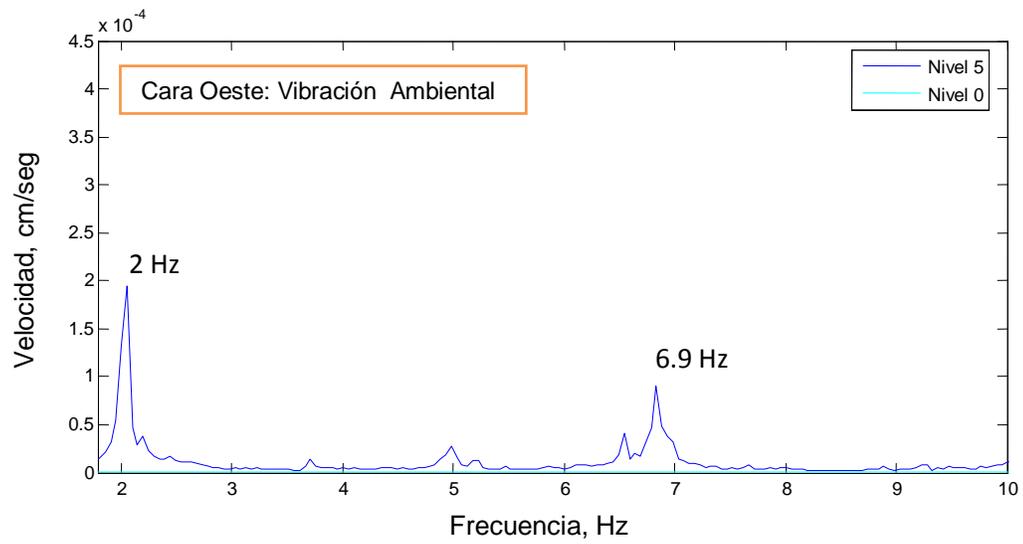


Figura 41. Cara Oeste: Espectro de amplitud de las observaciones de velocidad horizontal en la dirección N-S en los diferentes niveles de la cara oeste del edificio-prueba con daño, obtenidos a partir de vibración ambiental.

## **4.2. Formas modales del edificio-prueba con daño**

### **4.2.1. Respuesta en el dominio de la frecuencia**

Para identificar las formas modales correspondientes a las frecuencias características de 2 Hz, 5 Hz y 6.9 Hz, se calcularon los espectros de respuesta de las pruebas de vibración ambiental y vibración forzada.

Los espectros de respuesta para la frecuencia de 2 Hz para la vibración ambiental (Figura 42) y vibración forzada (Figura 43) son prácticamente iguales aunque con una mínima diferencia en el nivel 2 de la cara Este. Ambas figuras muestran cualitativamente un modo torsional relativamente pequeño y un modo traslacional dominante en la dirección Norte-Sur.

En la frecuencia de 5 Hz, ambos espectros, el de vibración ambiental (Figura 44) y el de vibración forzada (Figura 45), muestran un modo traslacional dominante en la dirección Este-Oeste.

Con respecto a la frecuencia de 6.9 Hz, es evidente un modo torsional tanto en la prueba de vibración ambiental (Figura 46) como en la de vibración forzada (Figura 47).

Los espectros de respuesta de vibración forzada y de vibración ambiental son prácticamente iguales y describen adecuadamente las formas modales del edificio.

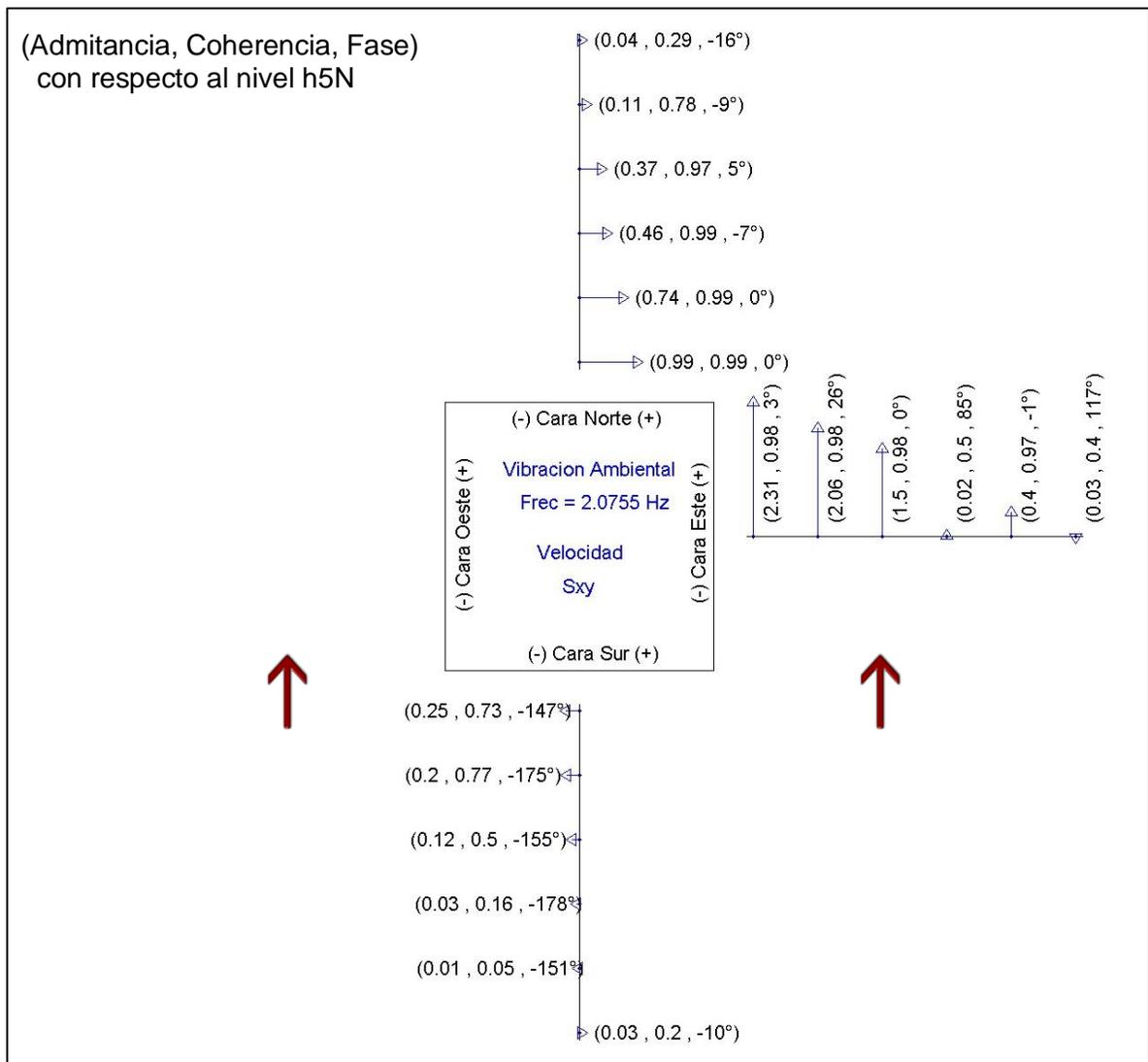


Figura 42. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración ambiental a 2.0 Hz.

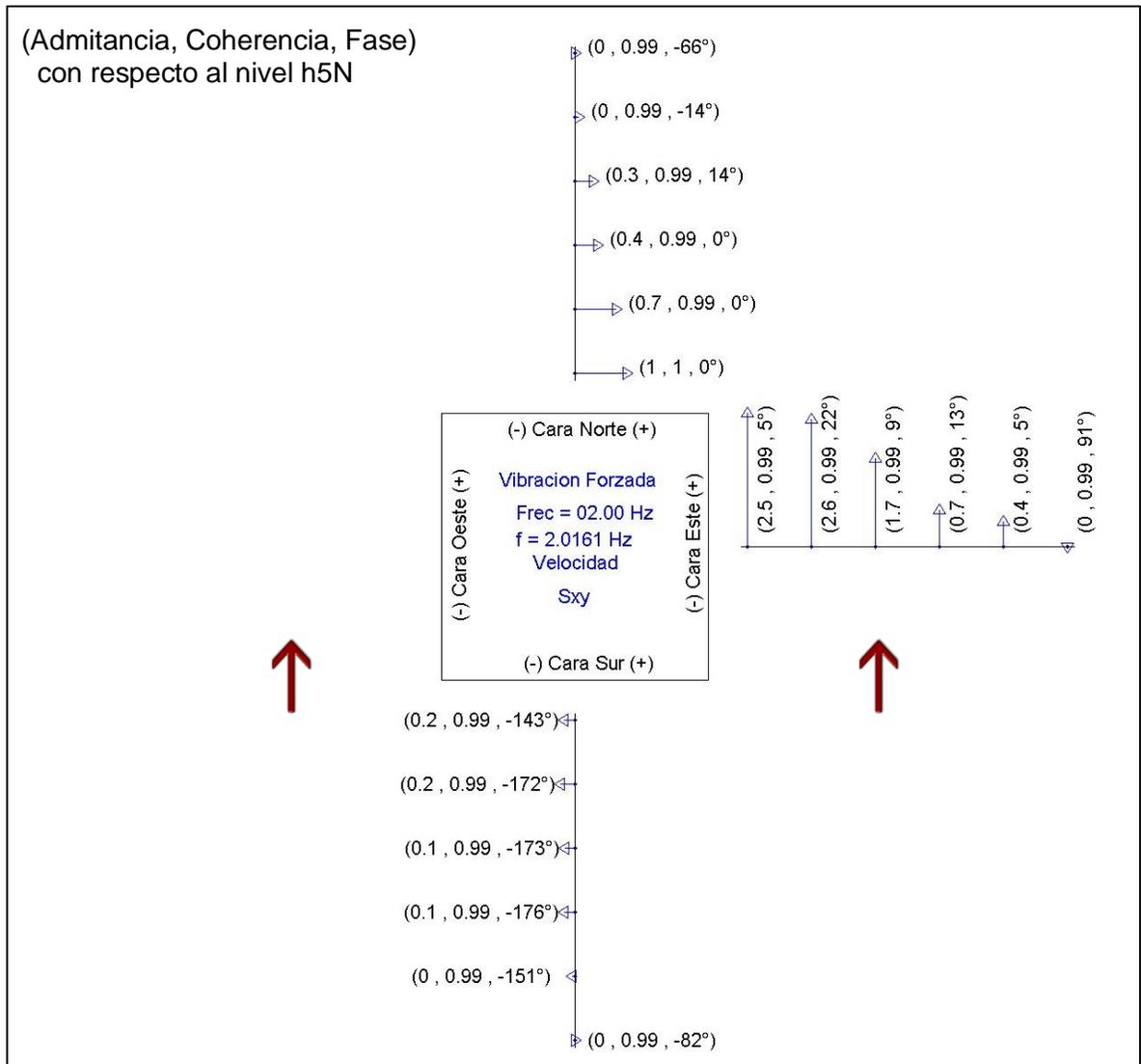


Figura 43. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración forzada a 2.0 Hz.

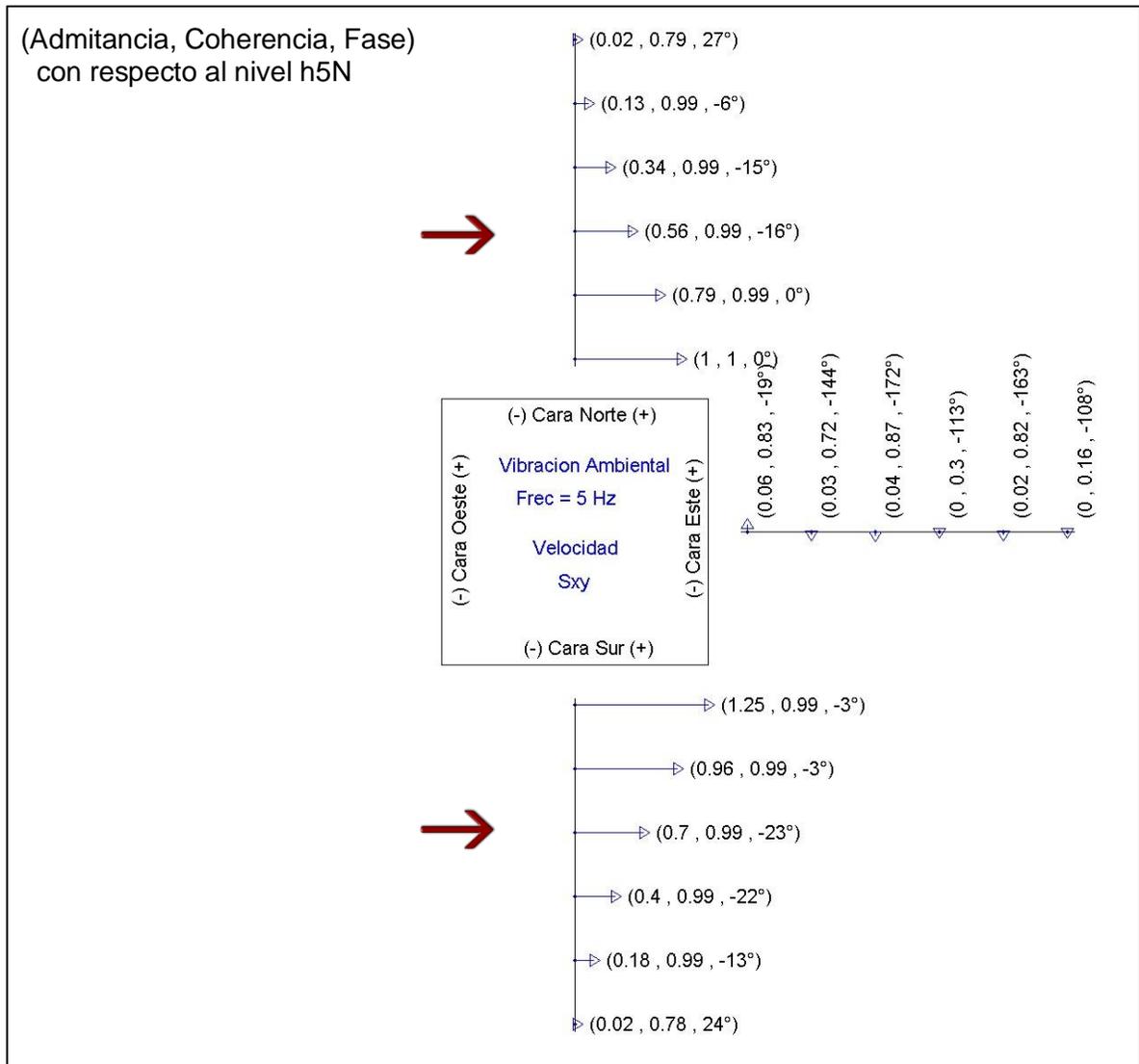


Figura 44. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración ambiental a 5 Hz.

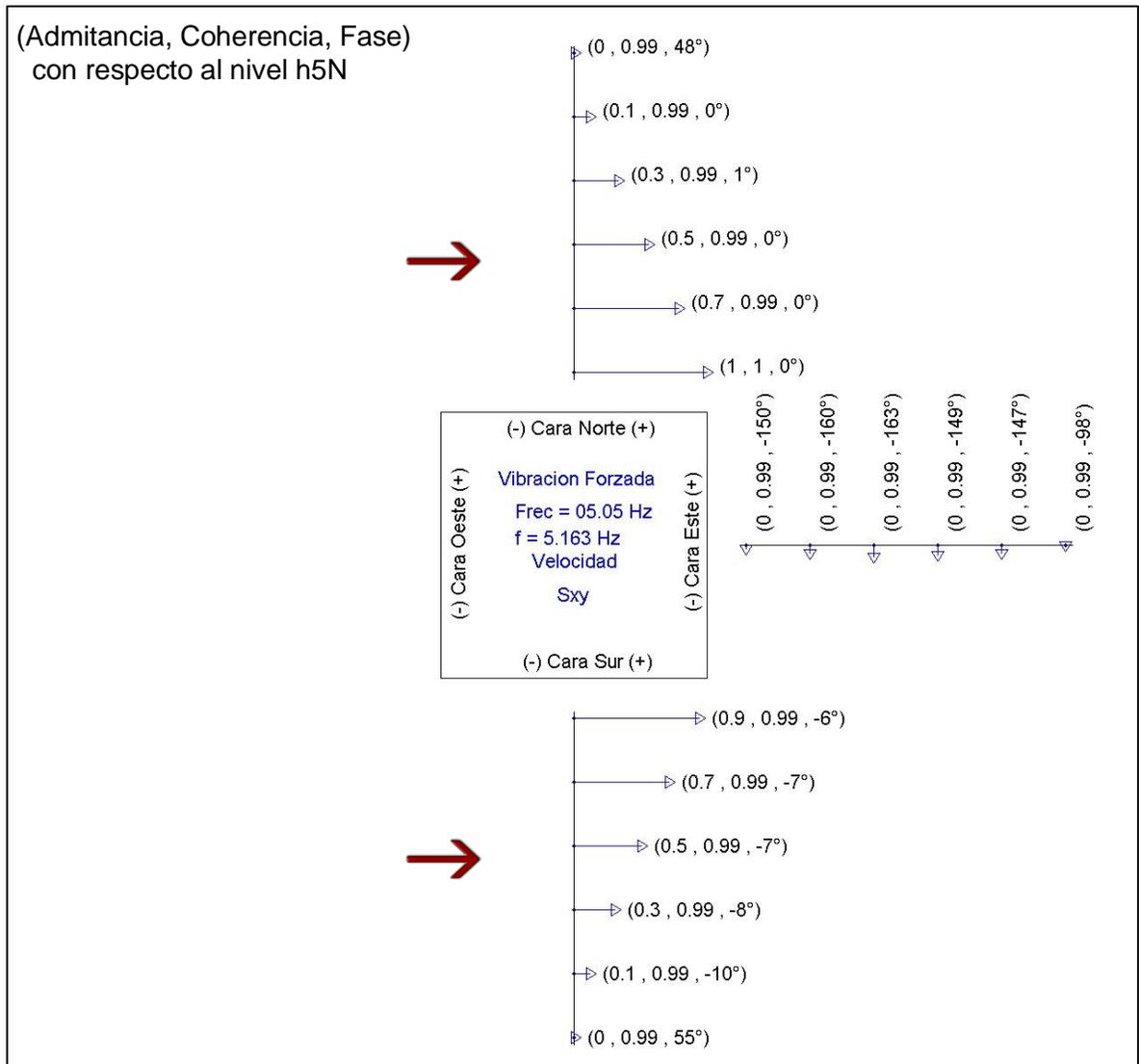


Figura 45. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración forzada a 5 Hz.

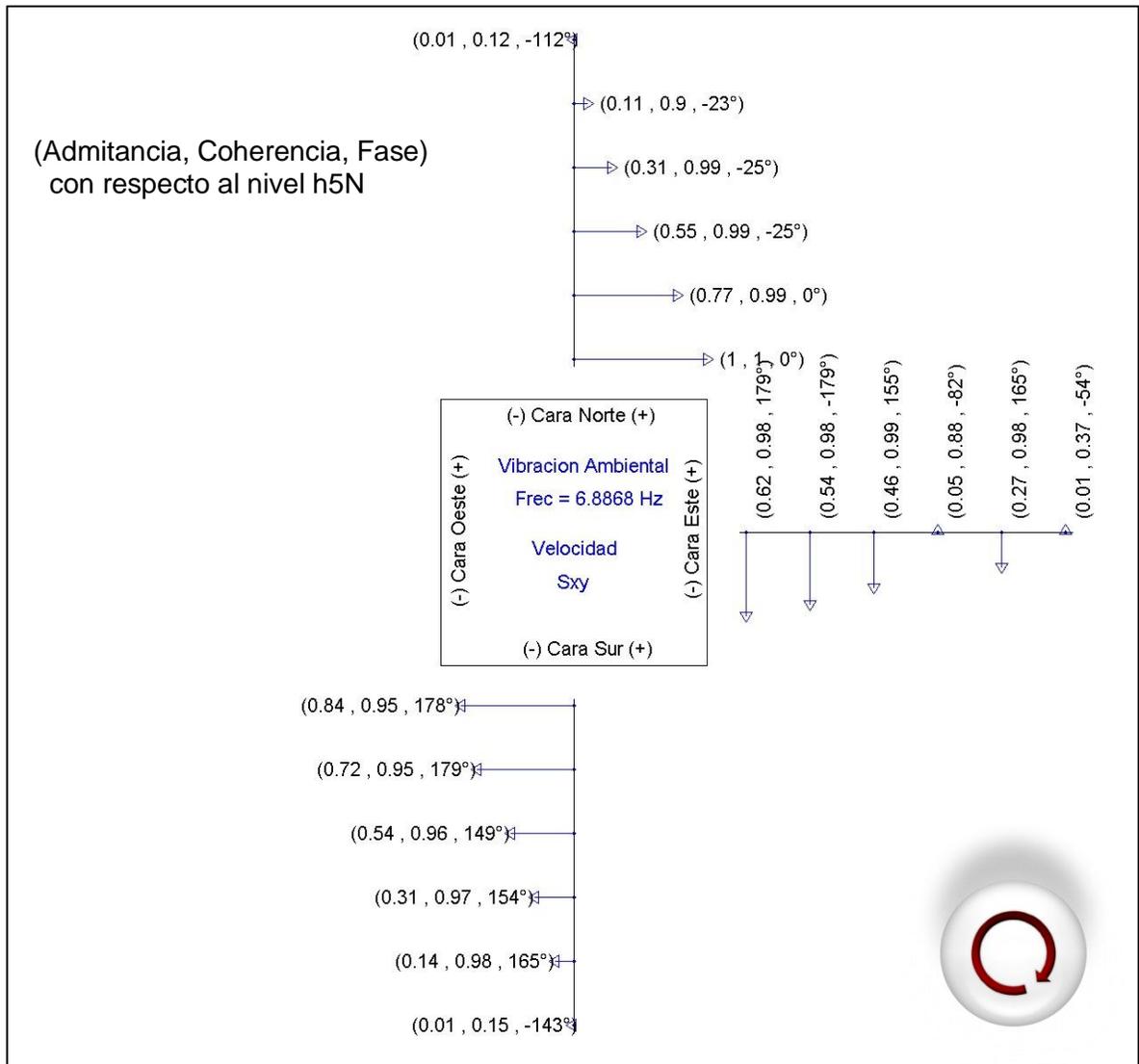


Figura 46. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración ambiental a 6.88 Hz.

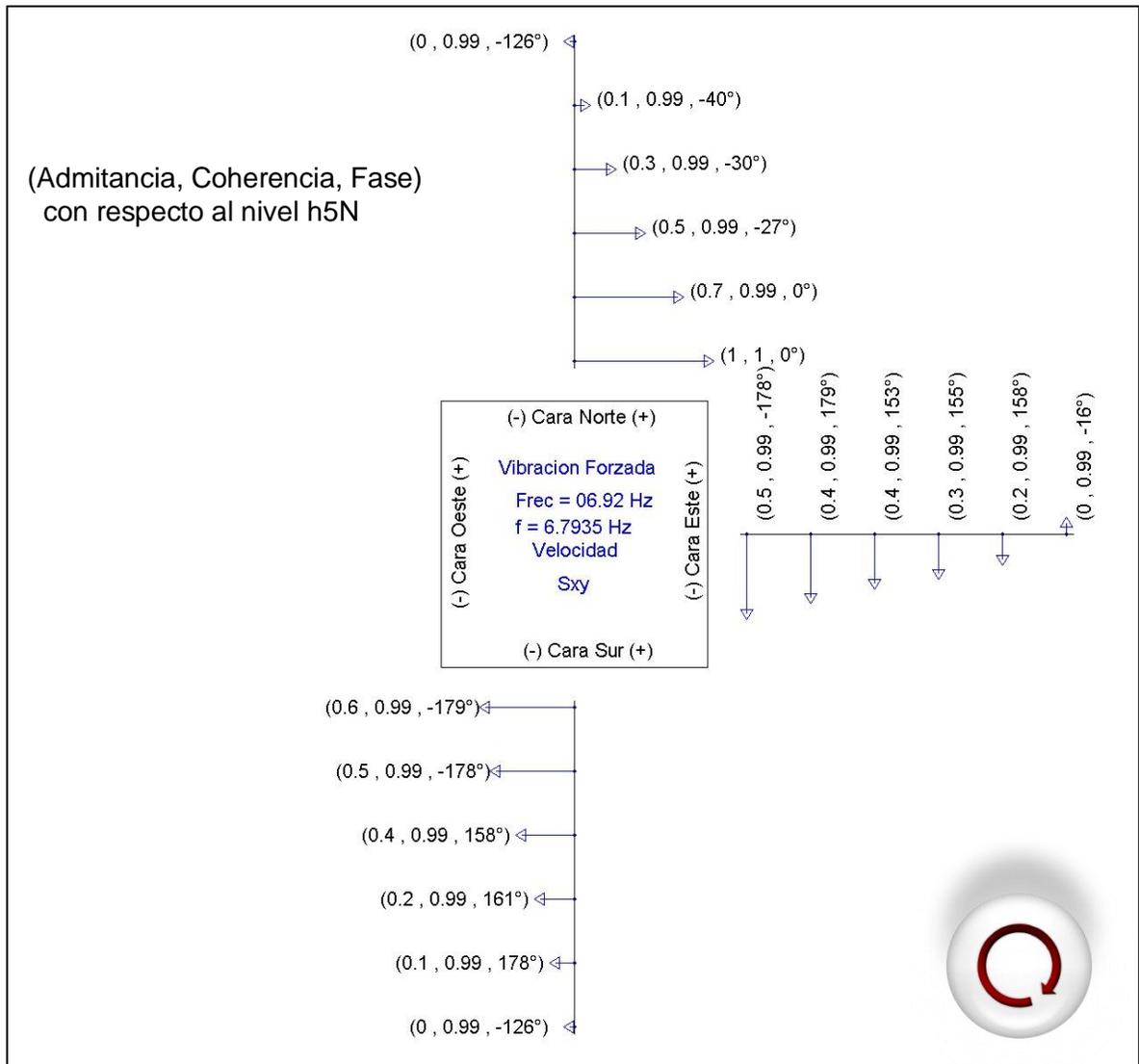


Figura 47. Respuesta del edificio-prueba con daño para la componente espectral de vibración forzada a 6.9 Hz.

#### 4.2.2. Descomposición en Valores Singulares (DVS) en el edificio-prueba con daño

Se aplicó el método DVS a las observaciones de vibración ambiental del edificio-prueba para identificar sus formas modales con el objetivo de comparar y, en su caso, corroborar los resultados obtenidos con los espectros cruzados.

Al igual que en la sección 3.2.2, las columnas de matriz “A” corresponden a las observaciones de vibración ambiental de las diferentes caras y niveles del edificio-prueba. Los valores singulares de “A” permiten identificar con facilidad las Componentes Principales y la importancia relativa de cada una de ellas. En este caso, como se indica en la Figura 48, las tres primeras componentes contienen el 99% de la varianza total de las observaciones de vibración ambiental.

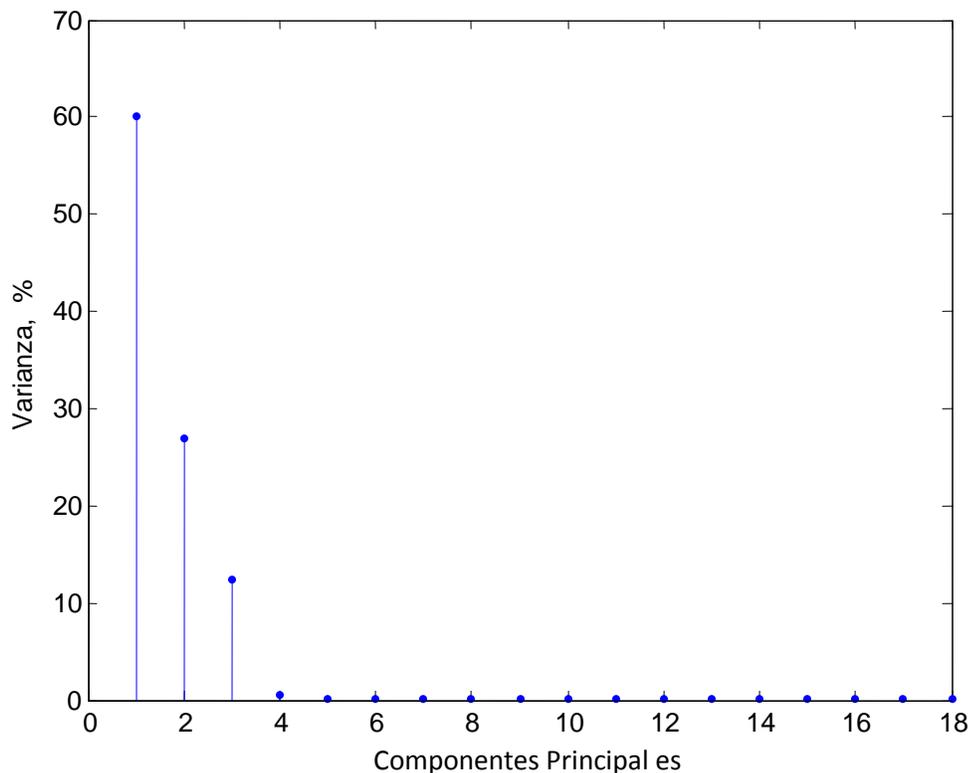


Figura 48. Variación porcentual de cada una de las Componentes Principales de la matriz “A”.

El espectro de Fourier de las tres primeras Componentes Principales de la matriz “A” permite identificar las frecuencias características del edificio. Como indica la Figura 49, la primera componente tiene un pico espectral en la frecuencia de 5 Hz; la segunda tiene un pico espectral en 2 Hz, y la tercera tiene un pico espectral en la frecuencia de 6.9 Hz.

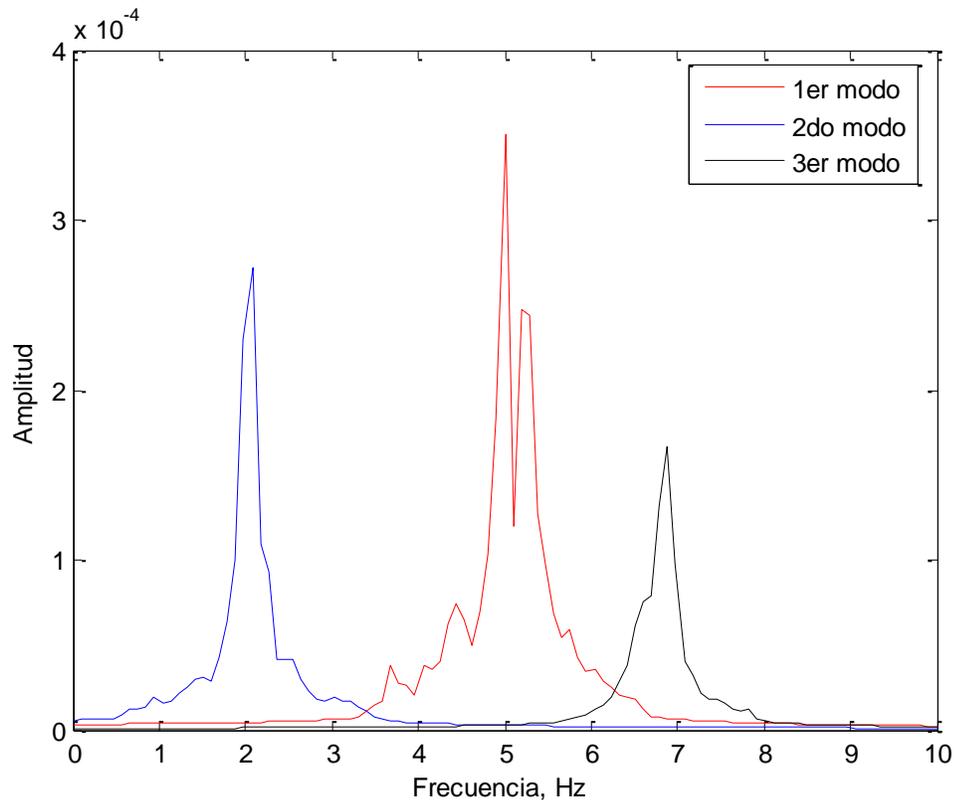


Figura 49. Espectro de las tres primeras Componentes Principales de la matriz A.

Los eigenvectores correspondientes a estas tres primeras componentes nos permiten visualizar las formas modales del edificio-prueba. En las Figuras 50-52 se muestra la amplitud relativa de las tres primeras Componentes Principales de la matriz A, mismas que a su vez representan a tres modos normales del edificio-prueba.

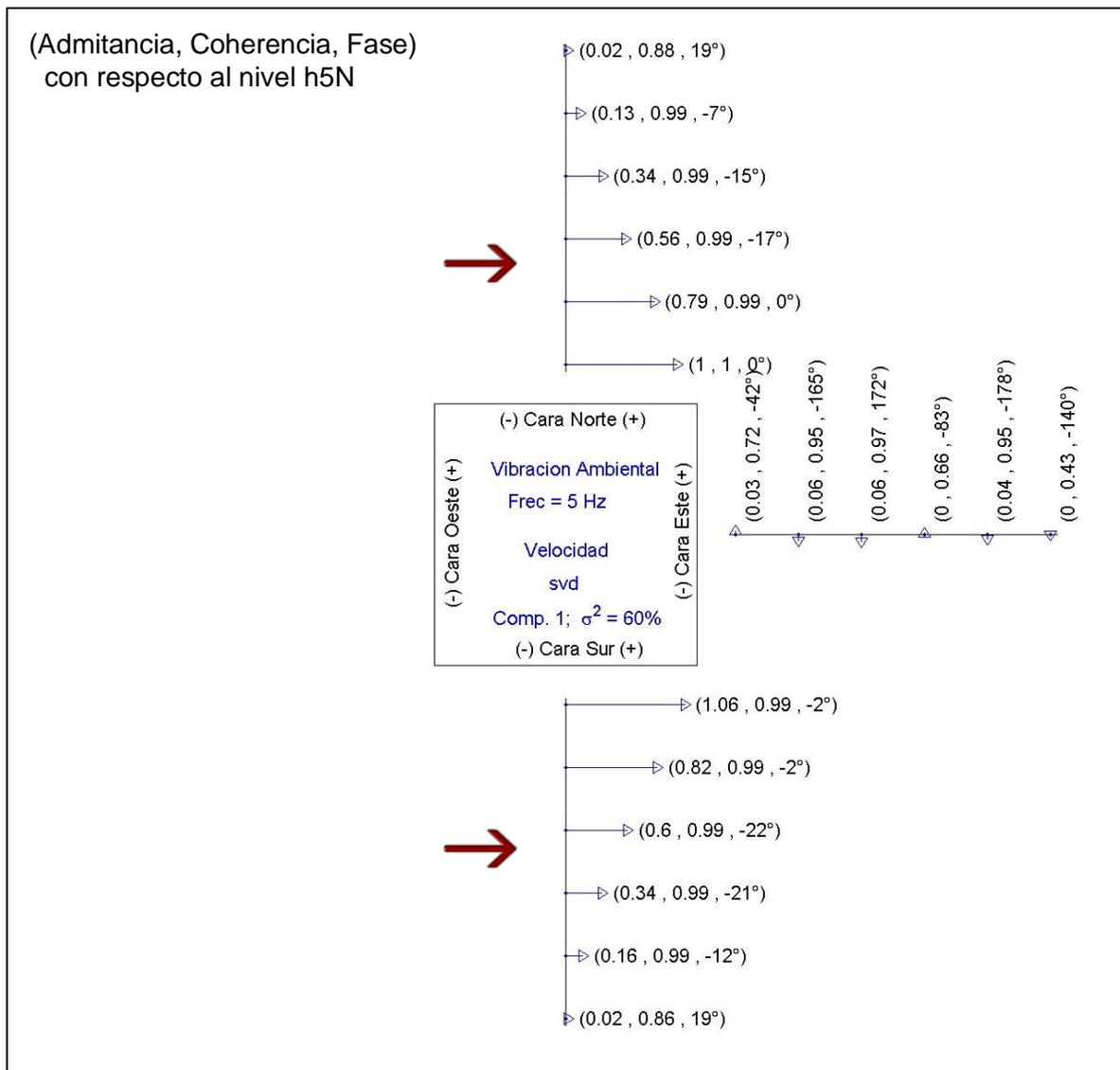


Figura 50. Forma modal del edificio-prueba con daño correspondiente a la primera Componente Principal que resulta de aplicar la DVS a la matriz A. Los eigenvectores que se indican en la figura están normalizados con el eigenvector del nivel h5N.

Los eigenvectores de la primera Componente Principal (Figura 50), muestran un modo traslacional dominante en la dirección Este-Oeste en la frecuencia de 5 Hz.

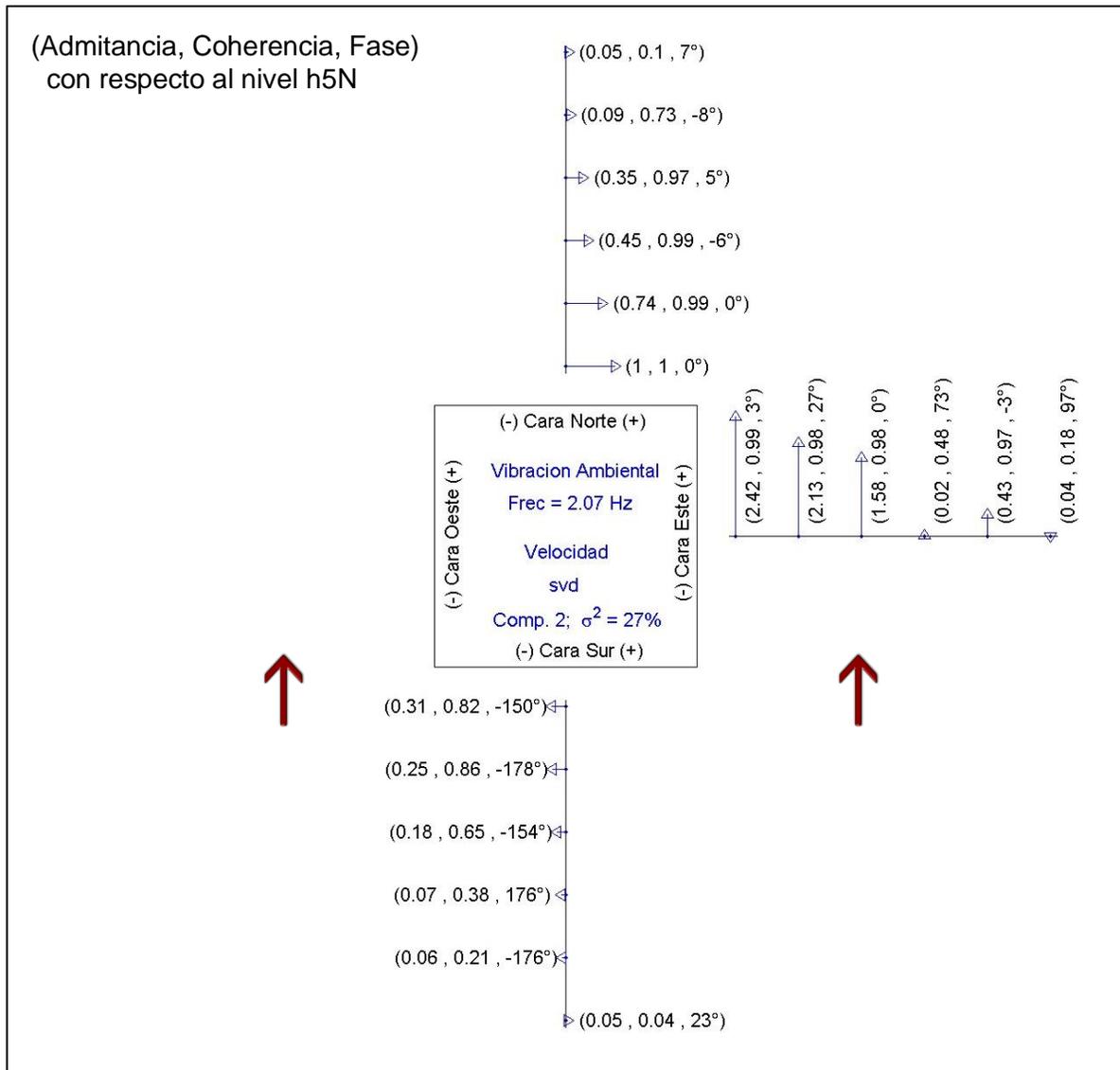


Figura 51. Forma modal del edificio-prueba con daño correspondiente a la segunda Componente Principal que resulta de aplicar la DVS a la matriz A. Los eigenvectores que se indican en la figura están normalizados con el eigenvector del nivel h5N.

Los eigenvectores de la segunda Componente Principal (Figura 51), muestran cualitativamente un modo torsional relativamente pequeño y un modo traslacional dominante en la dirección Norte-Sur, ambos modos en la frecuencia de 2 Hz.

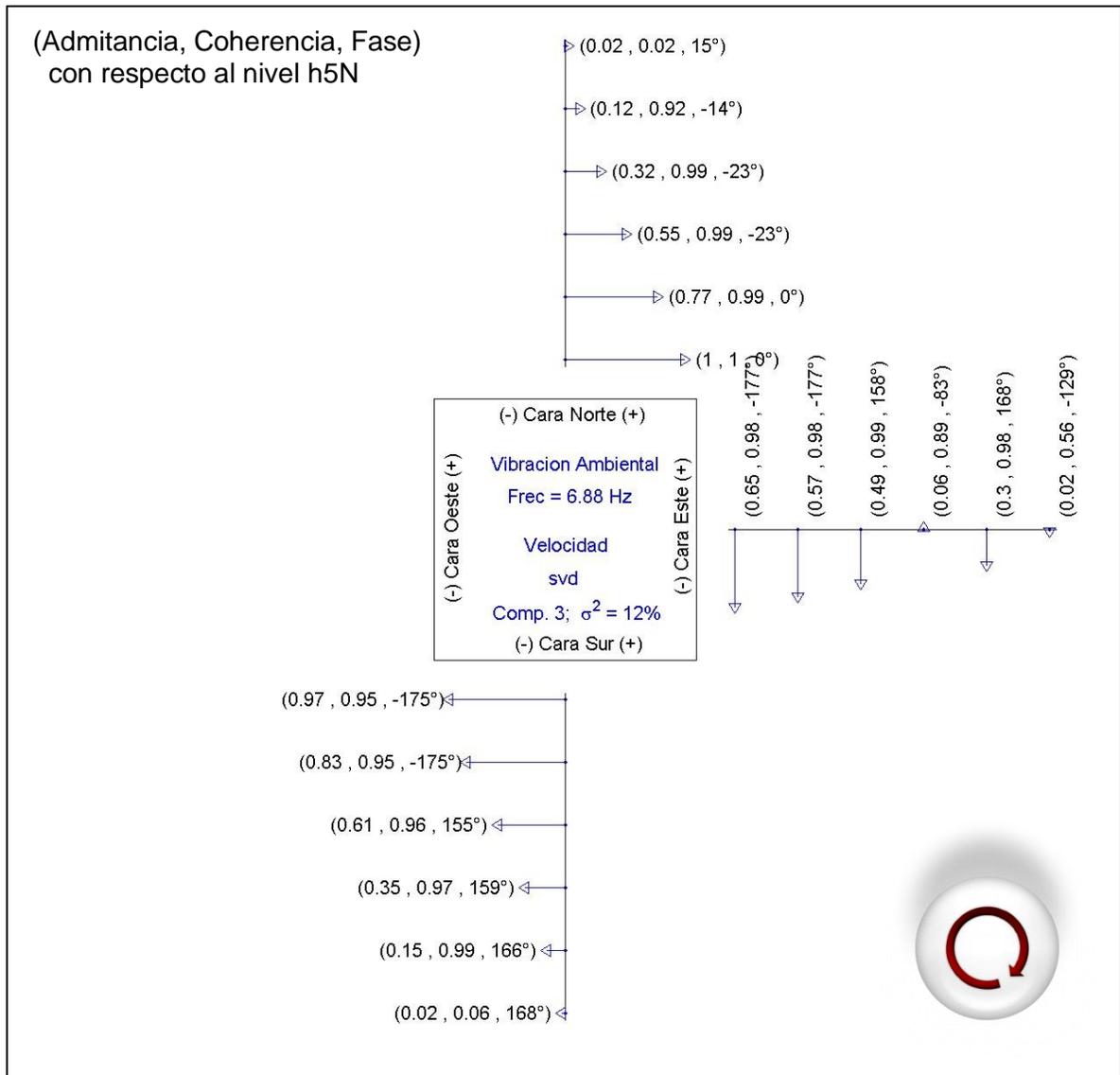


Figura 52. Forma modal del edificio-prueba con daño correspondiente a la tercera Componente Principal que resulta de aplicar la DVS a la matriz A. Los eigenvectores que se indican en la figura están normalizados con el eigenvector del nivel h5N.

Los eigenvectores de la tercera Componente Principal (Figura 52), muestran cualitativamente un modo torsional dominante en la frecuencia de 6.9 Hz.

Las tres formas modales del edificio-prueba obtenidas con el método DVS (Figura 50, 51 y 52), son prácticamente iguales a las obtenidas en la sección 4.2.1 con el método de espectros cruzados (Figura 42, 44 y 46).

### **4.3. Separación de la torsión de la traslación en el edificio-prueba con daño**

No es muy evidente el acoplamiento de torsión y traslación en una misma frecuencia en las formas modales del edificio-prueba con daño. Sin embargo, es importante separar de manera cuantitativa la traslación de la torsión en cada una de sus formas modales.

Al sumar las observaciones de velocidad en el dominio del tiempo, en las pruebas de vibración ambiental en las caras opuestas norte y sur del edificio-prueba con daño, se revela la traslación con un pico espectral dominante en la frecuencia de 5 Hz (Figura 53a). Esto indica que sólo existe un modo traslacional en la dirección Este-Oeste. Al restar las mismas velocidades de las caras opuestas se revela la torsión con un pico espectral dominante en la frecuencia de 6.9 Hz (Figura 53b) y uno de menor amplitud en la frecuencia de 2 Hz, indicando la presencia de dos modos torsionales.

En las caras opuestas Este y Oeste del edificio-prueba con daño, sólo coinciden las observaciones de vibración ambiental en los niveles 5 y 0 debido a que no se instrumentaron los niveles 1 a 4 de la cara Oeste. Al sumar las velocidades de las caras este y oeste, resulta un pico espectral dominante en la frecuencia de 2 Hz (Figura 53c), indicando que sólo existe un modo traslacional en la dirección Norte-Sur. Al restar las mismas velocidades, resulta un pico espectral dominante en la frecuencia de 6.9 Hz (Figura 53d), y uno de menor amplitud en la frecuencia de 2 Hz, lo que indica la presencia de dos modos torsionales.

Al separar la torsión de la traslación, podemos notar que, en la frecuencia de 2 Hz, existe un modo traslacional dominante en la dirección Norte-Sur acoplado con un poco de torsión. La frecuencia de 5 Hz corresponde a un modo traslacional dominante en la dirección Este-Oeste. Sin duda alguna, la frecuencia de 6.9 Hz es un modo torsional puesto que se puede observar tanto al hacer la diferencia en las caras Norte y Sur como en las caras Este y Oeste.

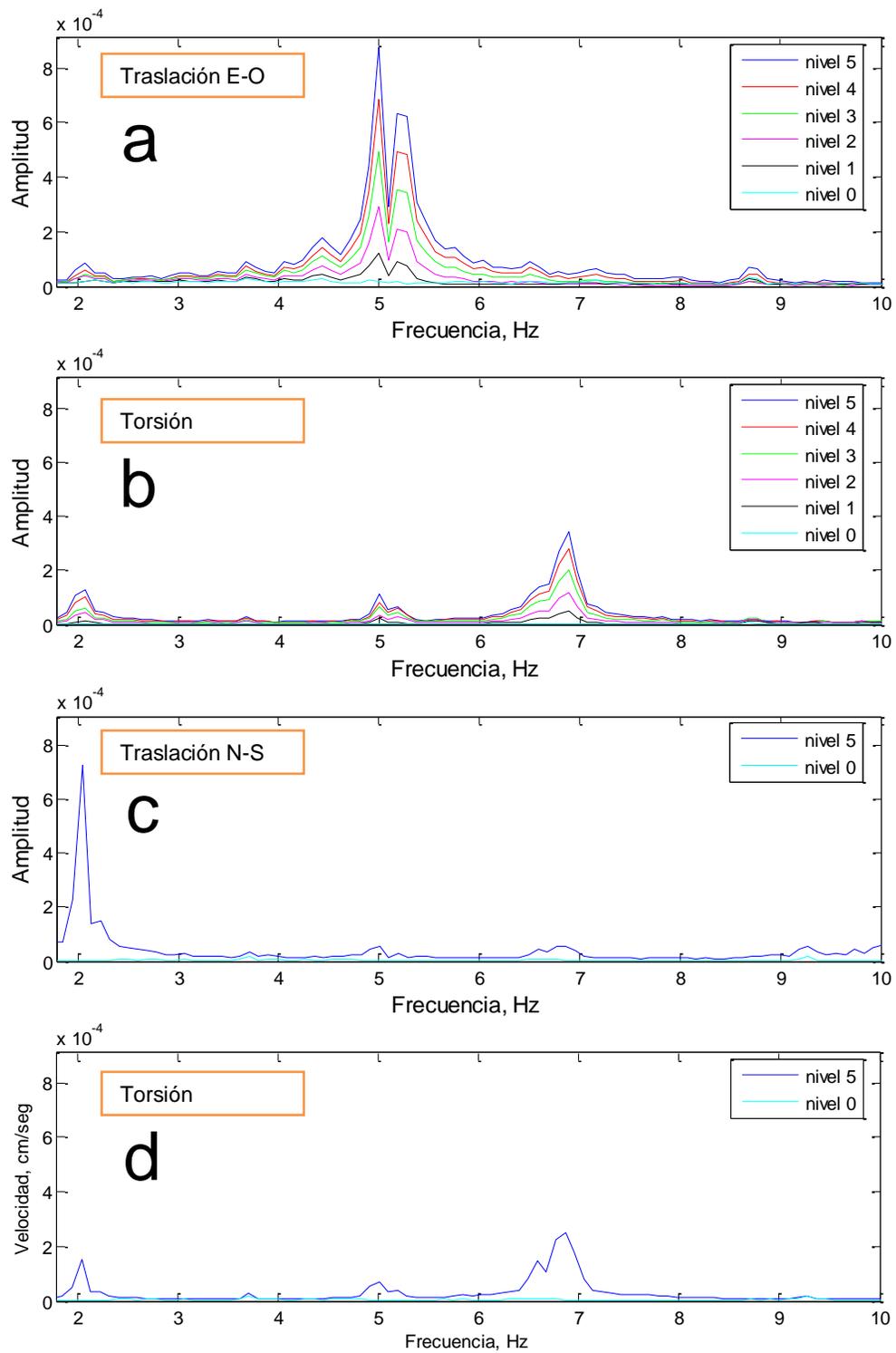


Figura 53. **a.** Traslación en la dirección Este-Oeste del edificio-prueba con daño. **b.** Torsión calculada con las caras Norte y Sur. **c.** Traslación en la dirección Norte-Sur. **d.** Torsión calculada con las caras Este y Oeste.

#### **4.4. Modos verticales de la base del edificio-prueba con daño**

##### **4.4.1. Balanceo (rocking)**

Los movimientos verticales de la base del edificio o formas modales de la base descritas en la Figura 12, deben estar acoplados con los modos horizontales torsionales y traslacionales.

Es de esperar que el modo traslacional horizontal en la dirección Norte-Sur en la frecuencia de 2 Hz produzca un balanceo de la base en la dirección Norte-Sur y que el modo traslacional horizontal en la dirección Este-Oeste en la frecuencia de 5 Hz produzca un balanceo de la base en la dirección Este-Oeste.

Al igual que en la sección 3.4.1, el balanceo en la dirección Norte-Sur se obtuvo de la diferencia de las velocidades verticales en estas caras. Sin embargo, en los resultados de vibración ambiental (Figura 54a) y de vibración forzada (Figura 54b) no se observa un pico espectral prominente en la frecuencia de 2 Hz.

El balanceo Este-Oeste muestra un pico espectral dominante en la frecuencia de 5 Hz en la prueba de vibración ambiental (Figura 55a) y una amplificación en amplitud en esta frecuencia en la prueba de vibración forzada (Figura 55b).

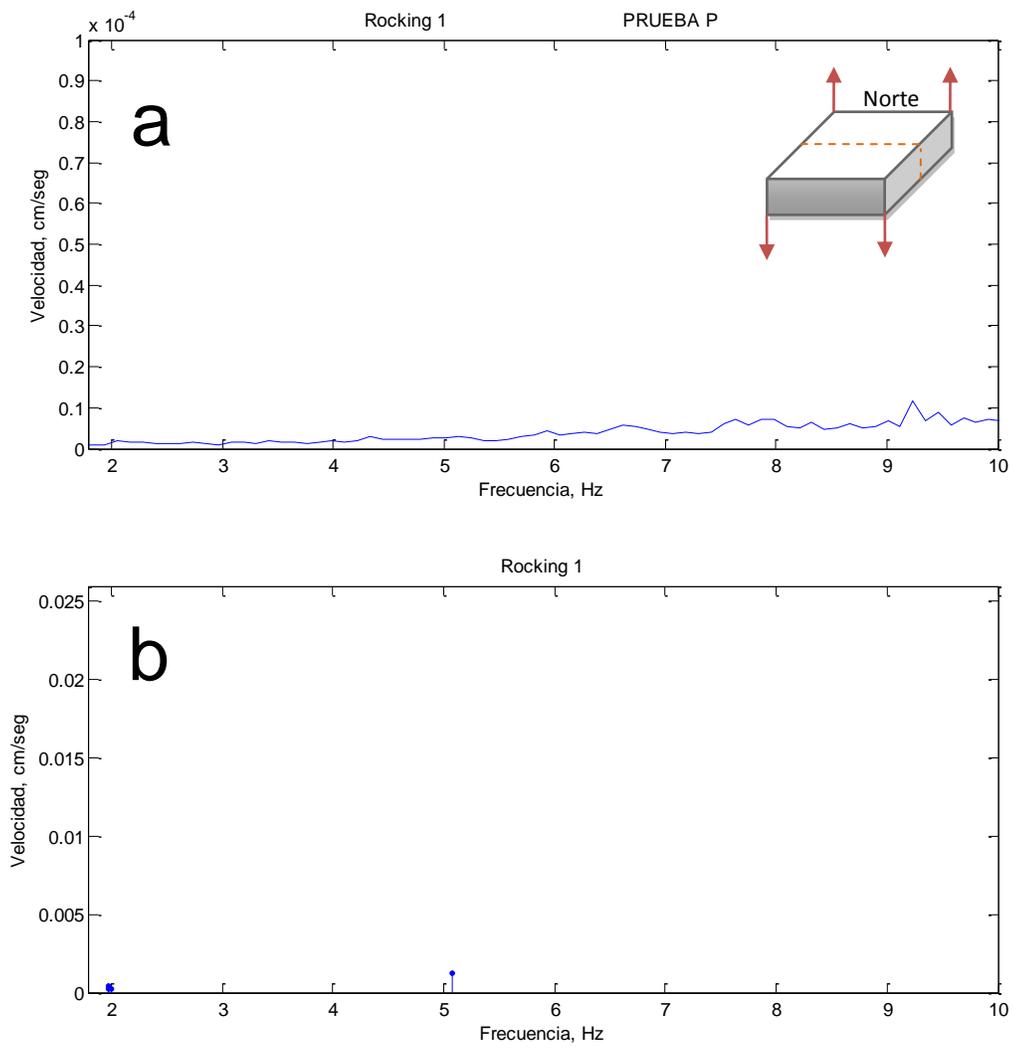


Figura 54. Balanceo de la base en la dirección Norte-Sur. **a.** vibración ambiental. **b.** vibración forzada.

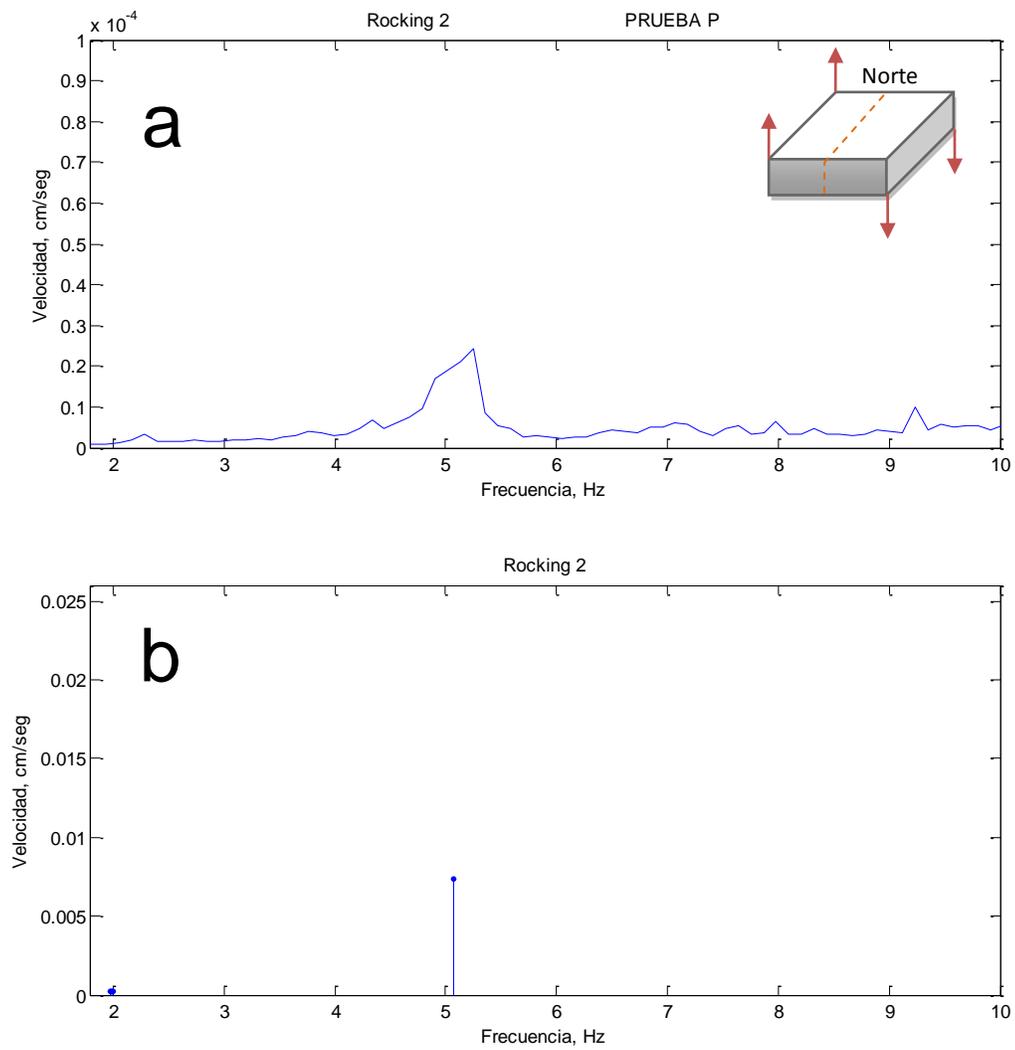


Figura 55. Balanceo de la base en la dirección Este-Oeste. **a.** vibración ambiental. **b.** vibración forzada.

#### 4.4.2. Pandeo en la base (warping)

Los modos horizontales torsionales en un edificio producen un pandeo de la base de la estructura. En este caso, los resultados de pandeo de la base del edificio-prueba, a partir de las observaciones de vibración ambiental (Figura 56a), corroboran la presencia de torsión en el edificio en la misma frecuencia (6.9 Hz) que en el modo torsional horizontal (Figura 52b). El pandeo de la base a esta misma frecuencia no se puede observar en las pruebas de vibración forzada (Figura 56b) debido a que no se seleccionaron frecuencias cercanas a 6.9 Hz.

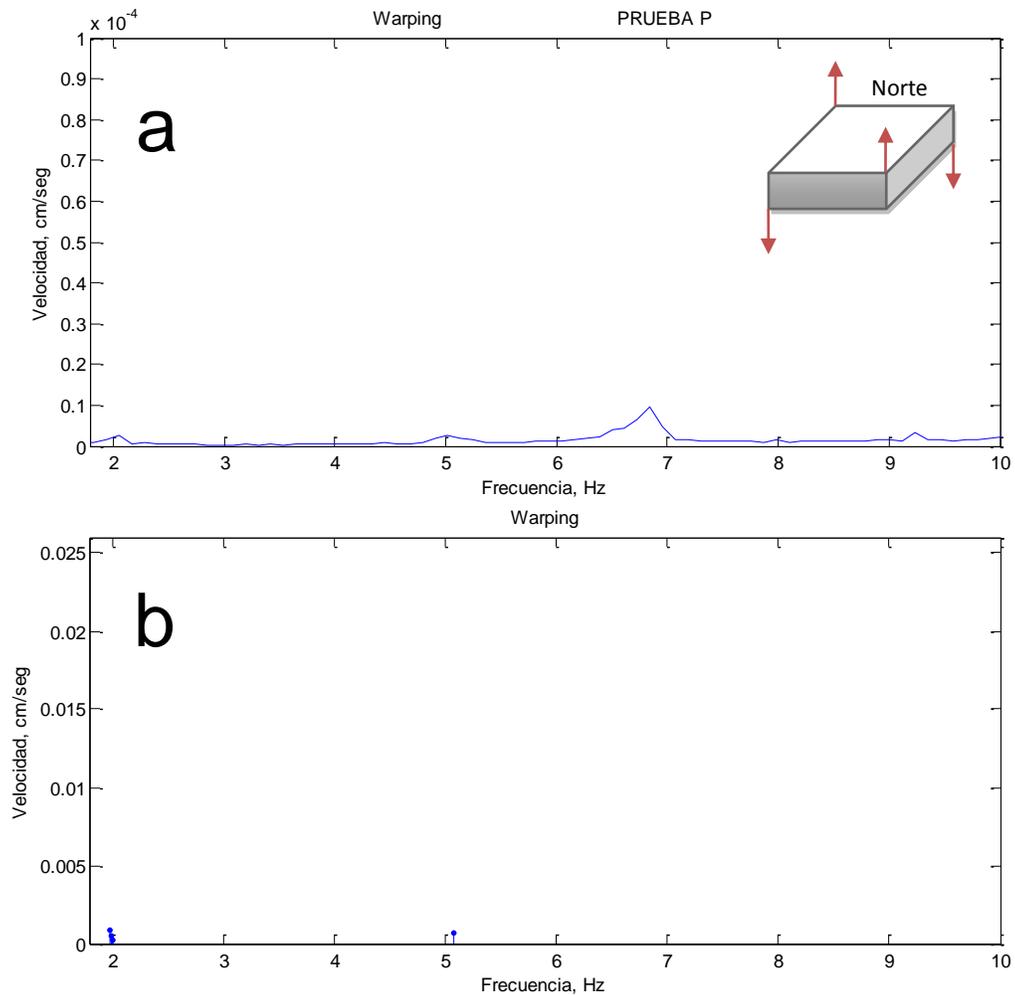


Figura 56. Pandeo de la base o torsión. **a.** vibración ambiental. **b.** vibración forzada.

## **5. Análisis del edificio-prueba reparado**

### **5.1. Identificación de frecuencias características**

Una vez reparado el edificio, se obtuvieron sólo datos de vibración ambiental.

La Figura 57(a,b,c) muestra los espectros resultantes de las pruebas de vibración ambiental para las cuatro caras del edificio-prueba. La cara oeste del edificio-prueba no se instrumentó debido a la falta de sensores en su momento.

En general, la observación de los espectros resultantes de la prueba de vibración ambiental, permite identificar tres frecuencias características: la primera de 3.3 Hz, presente en las tres caras del edificio y con una mayor amplitud en la cara este. La segunda frecuencia, de 6.1 Hz, se observa solo en las caras norte y sur, mientras que en la tercera, de 9 Hz, aparece en las tres caras del edificio.

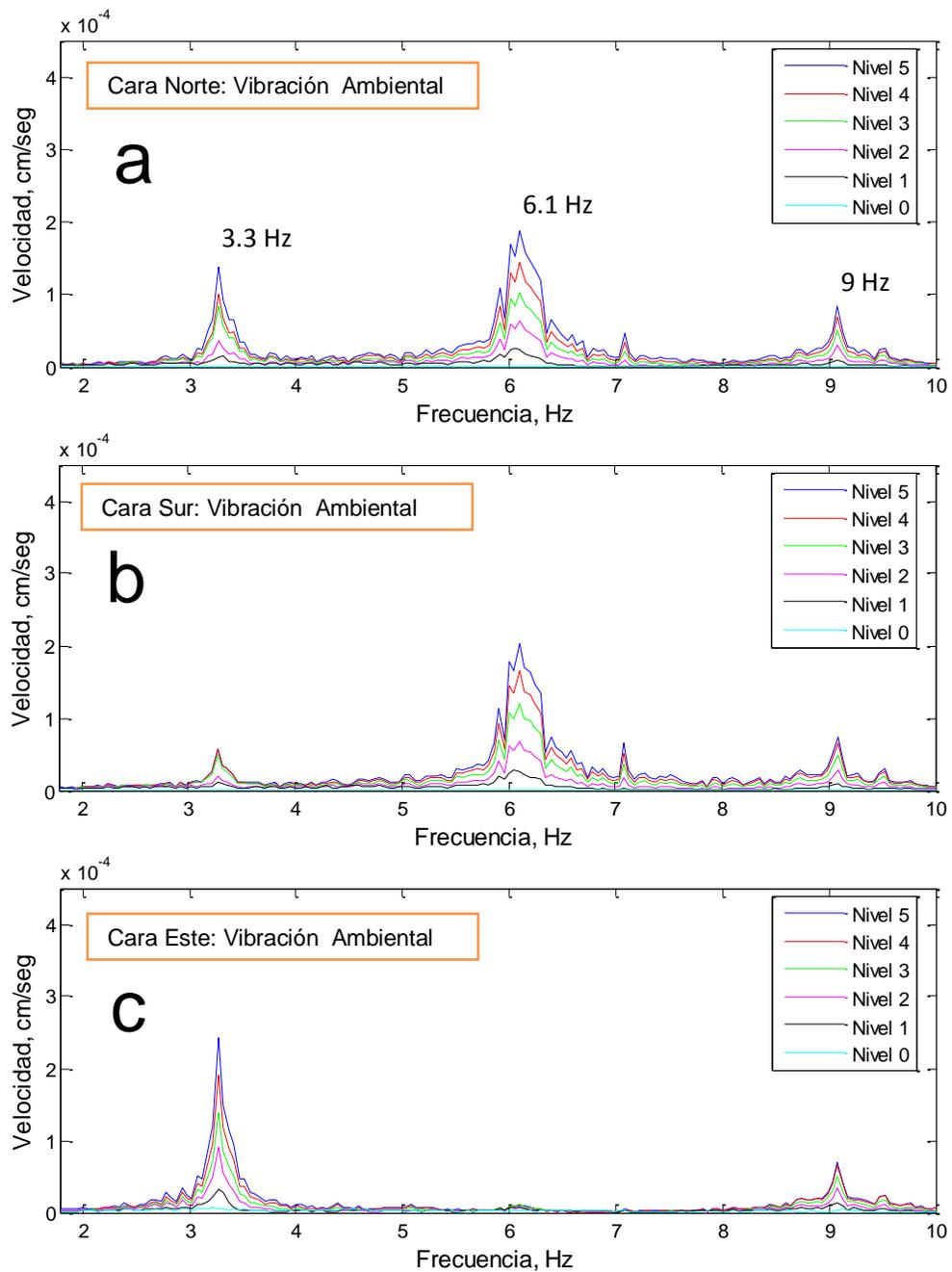


Figura 57. **a.** Componente horizontal en la dirección Este-Oeste, cara norte. **b.** Componente horizontal en la dirección Este-Oeste, cara Sur. **c.** Componente horizontal en la dirección Este-Oeste, cara este.

## **5.2. Identificación de formas modales del edificio-prueba reparado**

### **5.2.1. Respuesta en el dominio de la frecuencia**

La identificación de las formas modales correspondientes a las frecuencias características de 3.3 Hz, 6.1 Hz y 9 Hz, se calculan con los espectros de respuesta de la prueba de vibración ambiental. Los resultados muestran que en la frecuencia de 3.3 Hz (Figura 58) existe un modo traslacional dominante en la dirección Norte-Sur, acoplado con un modo torsional.

En la frecuencia de 6.1 Hz (Figura 59), observamos un modo traslacional dominante en la dirección Este-Oeste mientras que, la frecuencia de 9 Hz (Figura 60) indica un modo torsional.

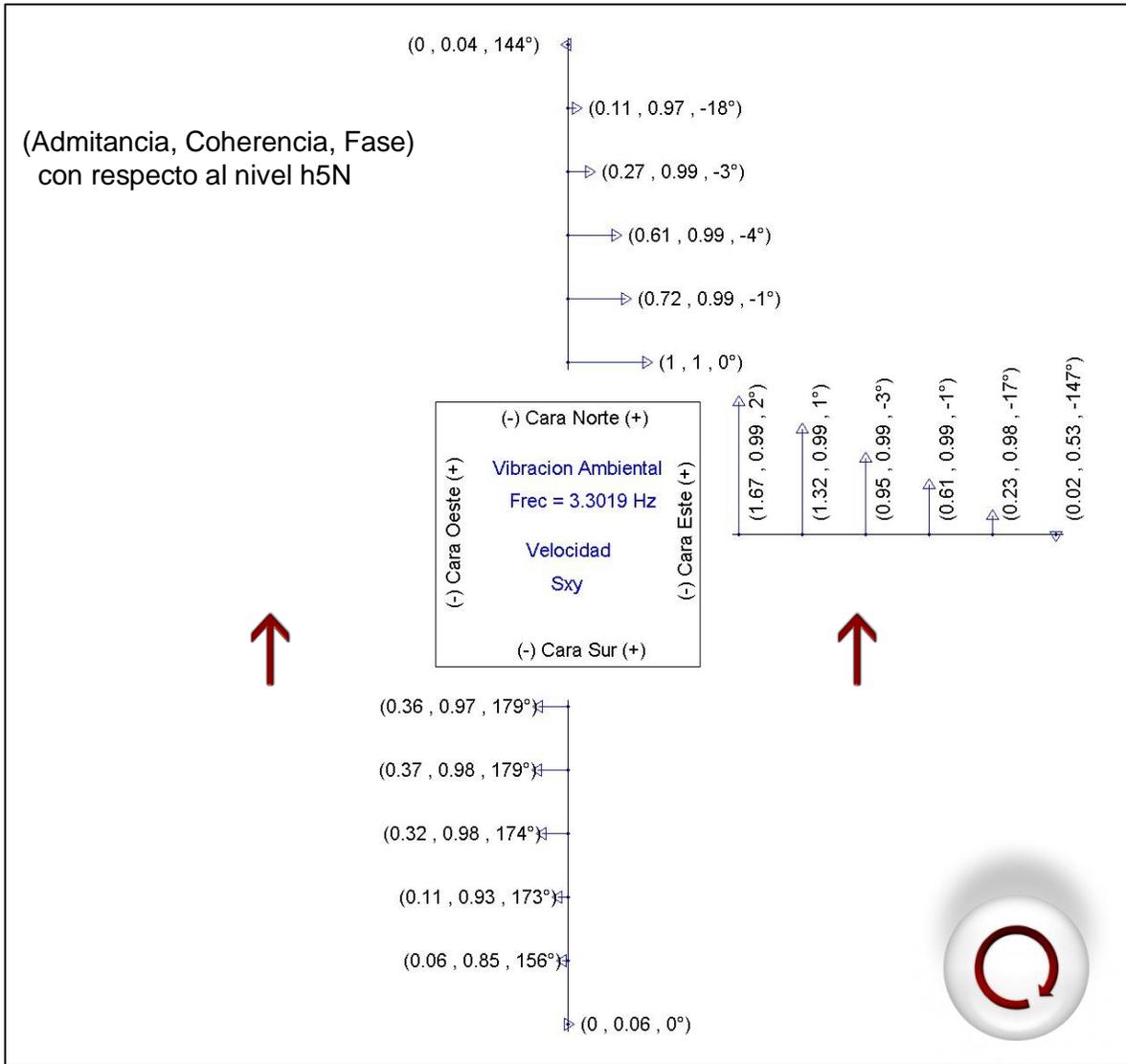


Figura 58. Respuesta del edificio-prueba reparado para la componente espectral de vibración ambiental a 3.3 Hz.

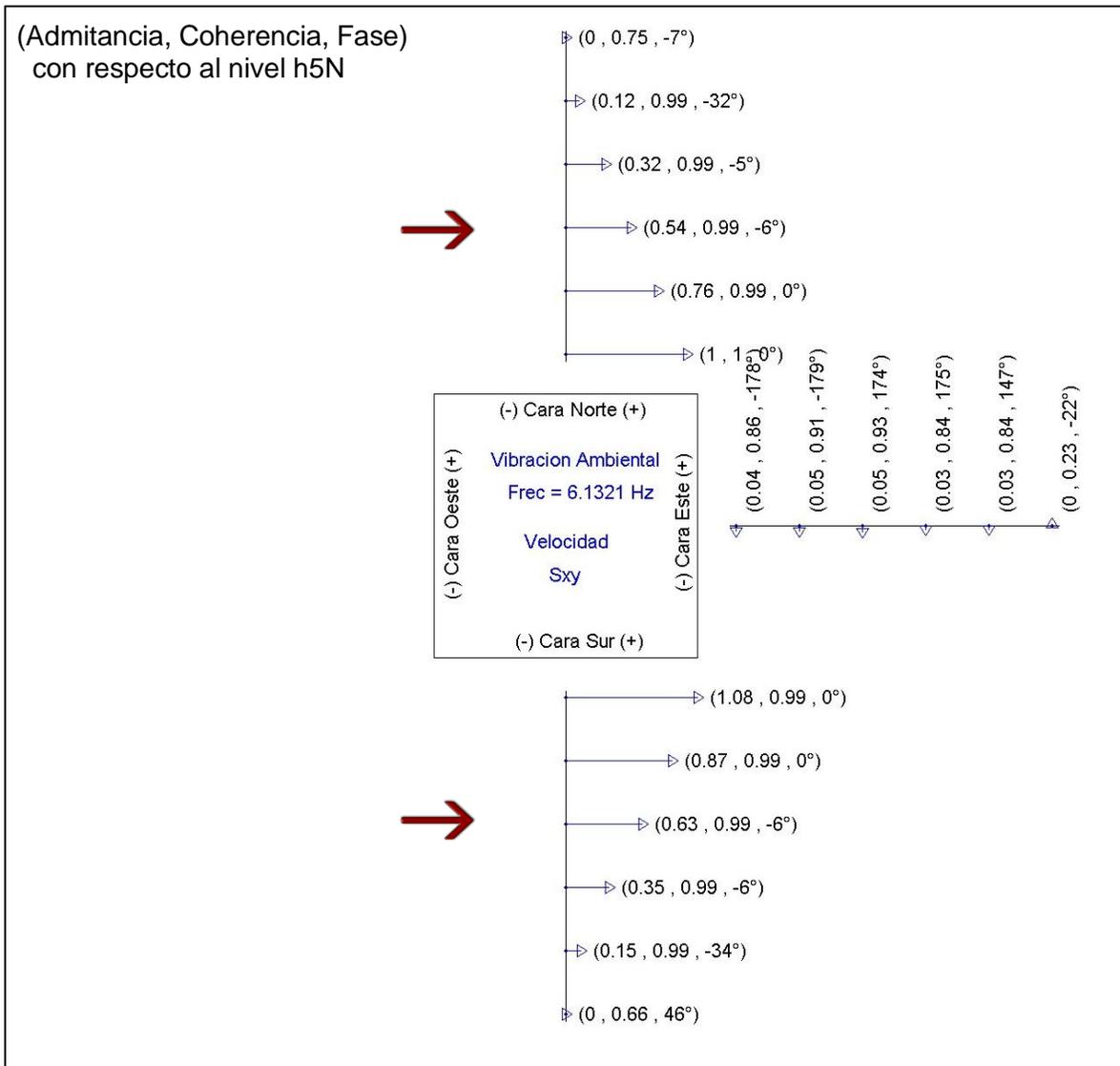


Figura 59. Respuesta del edificio-prueba reparado para la componente espectral de vibración ambiental a 6.1 Hz.

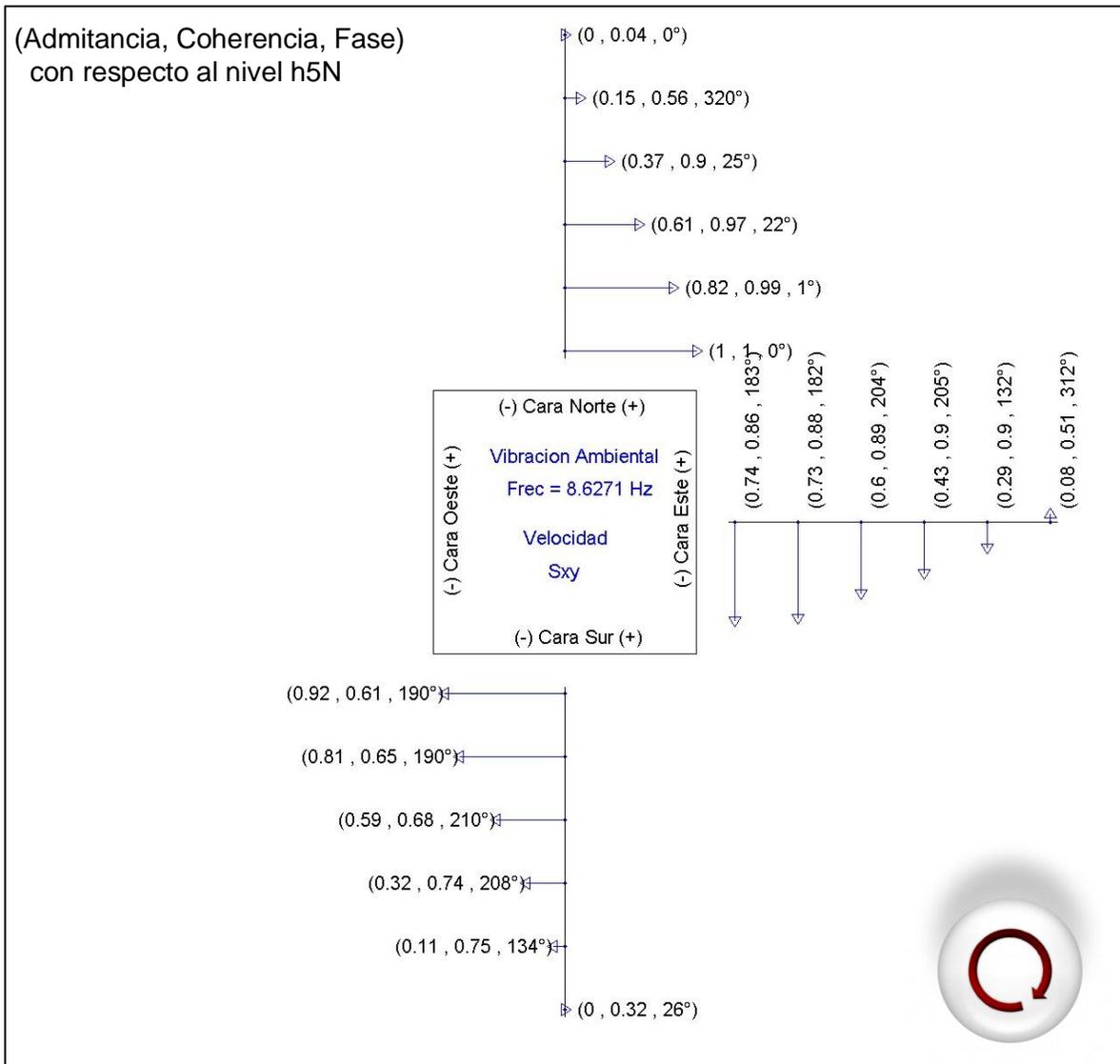


Figura 60. Respuesta del edificio-prueba reparado para la componente espectral de vibración ambiental a 9 Hz.

### 5.3. Separación de la torsión de la traslación en el edificio-prueba reparado

Al igual que en las pruebas de vibración del edificio sin daño y con daño, se separó la traslación de la torsión. La suma de las observaciones de vibración ambiental en las caras opuestas Norte y Sur del edificio-prueba reparado permite observar que el movimiento traslacional en la dirección Este-Oeste tiene un pico espectral dominante en la frecuencia de 6.1 Hz (Figura 61a). Al restar las mismas observaciones, no se observa un pico espectral en la frecuencia de 6.1 Hz (Figura 61b), y aparecen dos picos espectrales indicando que existe torsión y traslación en la frecuencia de 3.3 Hz (Figuras 61a y b), y torsión pura en la frecuencia de 9 Hz.

Al no contar con sensores en la cara Oeste del edificio-prueba reparado, no es posible separar la torsión de la traslación entre la cara Este y la cara Oeste.

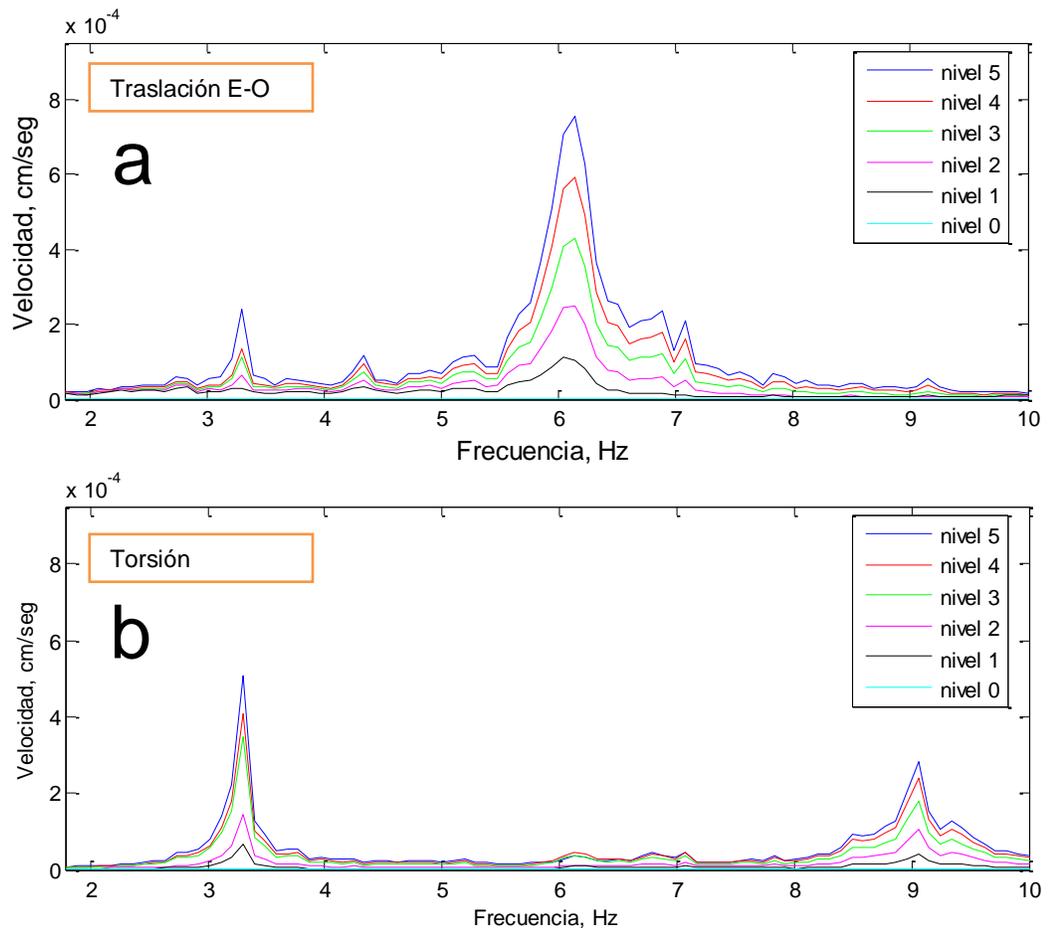


Figura 61. **a.** Traslación en la dirección Este-Oeste del edificio prueba. **b.** Torsión calculada con las caras Norte y Sur.

De estos resultados, podemos concluir que la frecuencia de 6.1 Hz corresponde a un modo traslacional puro en la dirección Este-Oeste y la frecuencia de 9 Hz, a un modo torsional puro.

La separación de la torsión de la traslación en la frecuencia de 3.3 Hz (Figura 61), indica que el modo torsional es el dominante; sin embargo, si observamos la respuesta de edificio-prueba reparado (Figura 58), podemos observar que la traslación en la dirección Norte-Sur, en la cara Este, es la que domina sobre la torsión.

## 6. Discusión de resultados

### 6.1. Cambio en frecuencias características y 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. El daño en un edificio está asociado con la pérdida de 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 62), se observan cambios en las frecuencias características del edificio-prueba con daño y reparado con respecto al edificio-prueba sin daño.

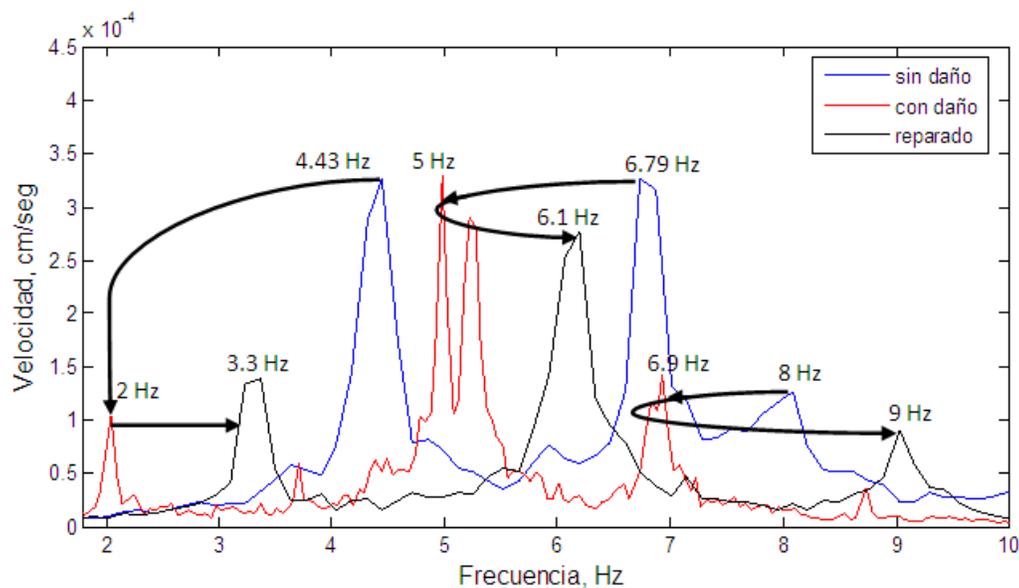


Figura 62. Espectros de amplitud de las observaciones de vibración ambiental del edificio-prueba sin daño, con daño y reparado.

El modo traslacional en la dirección Norte-Sur, frecuencia de 4.43 Hz, disminuye a 2 Hz después de que el edificio fue dañado y aumenta a 3.3 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 y con el modo traslacional en la frecuencia de 8 Hz.

Cabe destacar que los modos verticales del edificio-prueba, balanceo y pandeo, descritos en las secciones 3.4 y 4.4, y la correlación de éstos con los correspondientes modos horizontales, traslación y torsión, corroboran en gran medida que los espectros en la Figura 62 corresponden a modos normales horizontales del edificio-prueba.

Las formas modales de un edificio, obtenidas mediante los espectros de respuesta de vibración ambiental o forzada (ej., Figuras 24-25), son esenciales porque permiten contrastar al edificio contra el diseño del mismo o para verificar o descartar daños estructurales, en otras palabras, tanto la frecuencia de la forma modal que resulte del análisis dinámico del edificio, como su amplitud relativa en cada una de sus caras y niveles, debe ser igual a la que resulte del análisis de vibración ambiental o forzada.

Aun cuando en los objetivos de esta Tesis no se contempla cuantificar daños estructurales en el edificio-prueba empleando un modelo dinámico, en la siguiente sección se emplean los espectros de respuesta de vibración ambiental con la finalidad de identificar los niveles del edificio-prueba en donde se presenta el mayor daño.

## **6.2. Cambios en la coherencia y en la variancia de la fase**

En esta Tesis se plantea como hipótesis que cuando un edificio se daña, disminuye la coherencia debido a que aumenta la variancia de la diferencia de fase entre pisos o niveles consecutivos debido a su vez a la pérdida de rigidez del edificio.

En algunos edificios existe un acoplamiento de la torsión con la traslación en una misma banda de frecuencia debido a asimetrías propias de su diseño. En estos casos, es importante separar la torsión de la traslación para no sobreestimar la variancia de la diferencia de fase entre niveles consecutivos.

En el caso del edificio-prueba, analizamos los resultados del modo traslacional en la dirección Este-Oeste del edificio sin daño, con daño y reparado, debido a que por la ubicación de los sensores de vibración, es el único modo del edificio en el que se puede separar la torsión de la traslación para una misma banda de frecuencia. La Figura 63 muestra la amplitud relativa de la torsión y de la traslación en la dirección Este-Oeste del edificio-prueba sin daño, con daño y reparado.

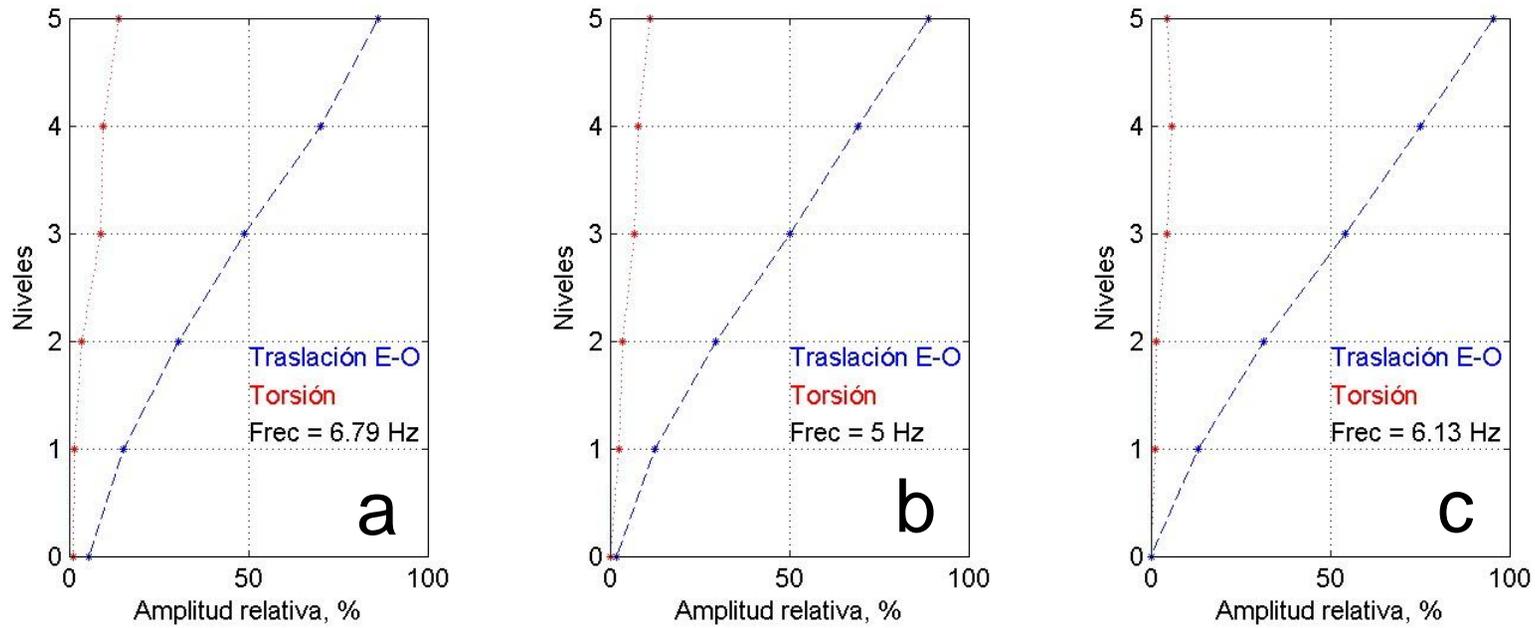


Figura 63. Amplitud relativa de la torsión y de la traslación en la dirección Este-Oeste del edificio-prueba: **a.** sin daño. **b.** con daño. **c.** reparado.

En los resultados (Figura 63), se observa cómo el modo traslacional en la dirección Este-Oeste es mucho mayor que la torsión en las tres etapas del edificio (sin daño, con daño y reparado). Sin embargo, en este caso particular, una inspección visual de la amplitud relativa de este modo traslacional en los diferentes niveles y en las tres etapas del edificio, no es suficiente para identificar cambios en la amplitud relativa que representen algún daño en alguno de los niveles del edificio.

Con la finalidad de poder observar cambios significativos del modo traslacional en la dirección Este-Oeste en las tres etapas del edificio, se procede a obtener los valores de admitancia, coherencia, diferencia de fase y variación de la diferencia de fase (desviación estándar de la fase), de todos los niveles con respecto al nivel 5. Las Tablas 5, 6 y 7 muestran los resultados del espectro de respuesta en las tres etapas del edificio, respectivamente.

En la Tabla 6 (edificio con daño) se observa cómo la coherencia disminuye en los niveles ho al h3 a partir de la cuarta cifra significativa con respecto a la coherencia del edificio sin daño (Tabla 5), y cómo la desviación estándar de la fase aumenta en los niveles ho al h3.

Al igual que la Tabla 6, en la Tabla 7 (edificio reparado) se observa cómo la coherencia disminuye, aunque en menor cantidad, en los niveles ho al h3 a partir de la cuarta cifra significativa con respecto a la coherencia del edificio sin daño (Tabla 5), y cómo la desviación estándar de la fase aumenta en los niveles ho al h3.

Tabla 5. Edificio-prueba sin daño. Modo traslacional en la dirección Este-Oeste. Método de espectros cruzados. Se indica el intervalo de confianza al 90% en la desviación estándar de la fase.

Modo Traslacional en la dirección E-O - F = 6.79 Hz ; T = 0.14 seg				
Nivel	Admitancia	Coherencia	Fase, grados	Desviacion estandar de la fase en tiempo (segundos)
h5	1	1	0	0
h4	0.81	0.999979	0.6666	0.0001 < 0.0002 < 0.0003
h3	0.56	0.999895	-20.2271	0.0004 < 0.0005 < 0.0007
h2	0.35	0.999450	-20.1404	0.0009 < 0.0012 < 0.0018
h1	0.17	0.996958	-4.3398	0.0021 < 0.0028 < 0.0042
ho	0.06	0.967202	17.2033	0.0070 < 0.0092 < 0.0137

Tabla 6. Edificio-prueba con daño. Modo traslacional en la dirección Este-Oeste. Método de espectros cruzados. Se indica el intervalo de confianza al 90% en la desviación estándar de la fase.

Modo Traslacional en la dirección E-O - F = 5.18 Hz ; T = 0.19 seg				
Nivel	Admitancia	Coherencia	Fase, grados	Desviacion estandar de la fase en tiempo (segundos)
h5	1	1	0	0
h4	0.77	0.999989	0.2322	0.0001 < 0.0002 < 0.0003
h3	0.56	0.999872	-19.118	0.0006 < 0.0008 < 0.0012
h2	0.33	0.999117	-17.2382	0.0015 < 0.0020 < 0.0029
h1	0.14	0.991769	-8.2255	0.0046 < 0.0060 < 0.0089
ho	0.02	0.724974	21.515	0.0265 < 0.0347 < 0.0515

Tabla 7. Edificio-prueba reparado. Modo traslacional en la dirección Este-Oeste. Método de espectros cruzados. Se indica el intervalo de confianza al 90% en la desviación estándar de la fase.

Modo Traslacional en la dirección E-O - F = 6.1 Hz ; T = 0.16 seg				
Nivel	Admitancia	Coherencia	Fase, grados	Desviacion estandar de la fase en tiempo (segundos)
h5	1	1	0	0
h4	0.78	0.999983	0.2084	0.0001 < 0.0002 < 0.0003
h3	0.56	0.999879	-6.5358	0.0005 < 0.0006 < 0.0009
h2	0.32	0.999341	-5.8925	0.0010 < 0.0014 < 0.0020
h1	0.13	0.994522	-33.1947	0.0031 < 0.0041 < 0.0061
ho	0	0.741425	11.2632	0.0217 < 0.0285 < 0.0423

Dada la magnitud tan pequeña de las diferencias, tanto en la coherencia como en la desviación estándar de la fase, es sumamente difícil asociar analíticamente a estas diferencias con algún daño en los diferentes niveles del edificio-prueba. Sin embargo, a pesar de que se observa un traslape en los intervalos de confianza de la desviación estándar de la fase (Tablas 5-7), cabe la posibilidad de interpretar cualitativamente a estas diferencias expresándolas en su forma porcentual, como se indica en la Tabla 8.

Nota: Las diferencias en la desviación estándar de la fase del edificio-prueba con daño con respecto al edificio-prueba sin daño en los niveles ho a h3, son significativas cuando el intervalo de confianza se calcula al 75%.

Tabla 8. Diferencias porcentuales de la desviación estándar de la fase del edificio-prueba con daño con respecto al edificio-prueba sin daño.

Nivel	Diferencia porcentual de la desviación estándar de la fase
h5	0 %
h4	0 %
h3	<b>60 %</b>
h2	<b>66 %</b>
h1	<b>114 %</b>
ho	<b>277 %</b>

En los resultados (Tabla 8) se observa con más claridad cómo la desviación estándar de la fase del edificio-prueba con daño aumenta porcentualmente con respecto a la desviación estándar de la fase del edificio-prueba sin daño en los niveles ho al h3.

Es difícil de comprobar analíticamente la hipótesis de que cuando un edificio se daña aumenta la variancia de la diferencia de fase entre pisos consecutivos, sin embargo, como se muestra en la Figura 64, existe buena correlación de esta hipótesis con los daños observados y cuantificados en el edificio-prueba.

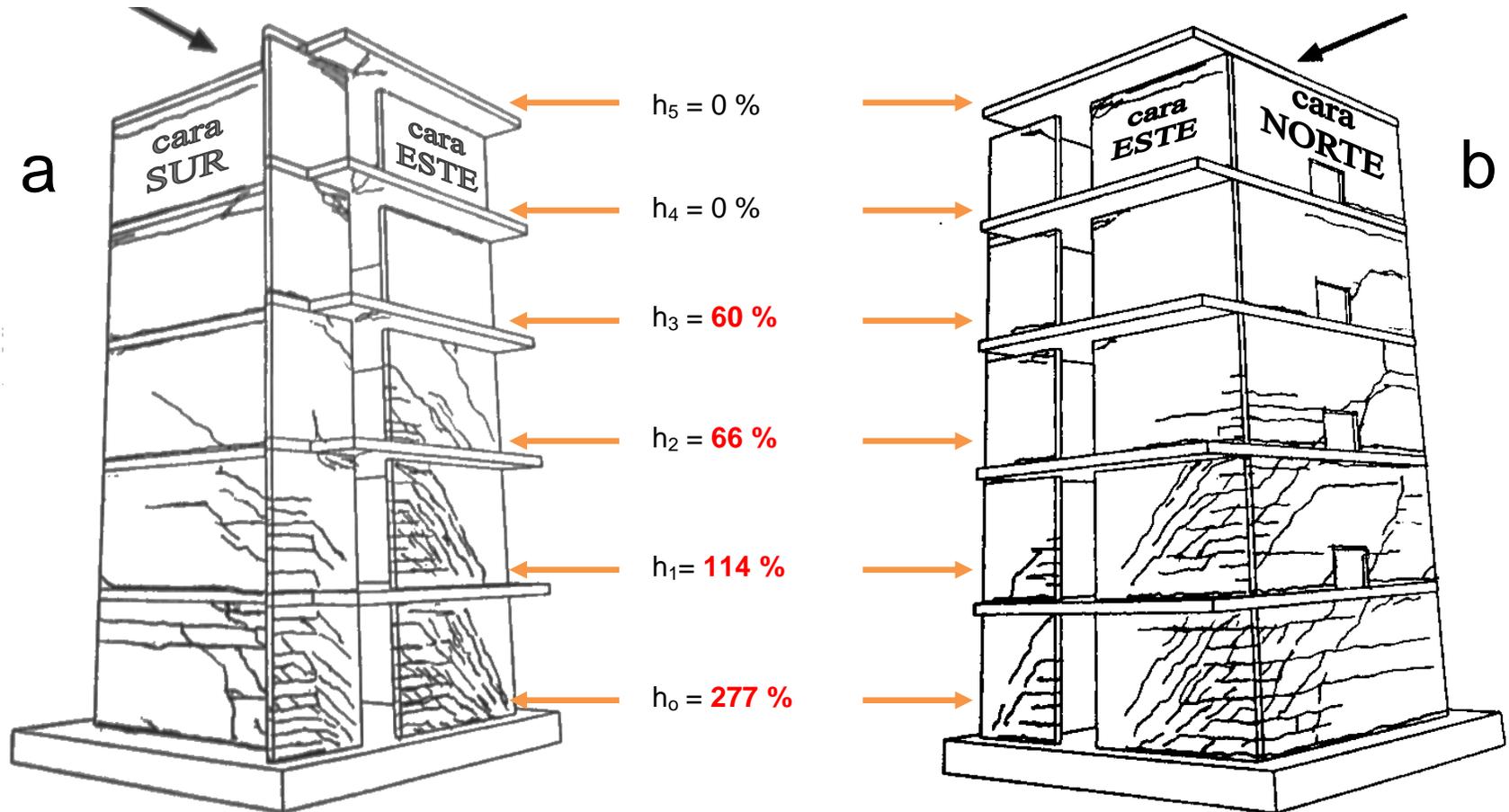


Figura 64. Vista del patrón de fisuras o daños a la: **a.** compresión y a la **b.** tensión en la dirección de las cargas en el edificio-prueba. Los números indican las diferencias porcentuales de la desviación estándar de la fase del modo traslacional en la dirección Este-Oeste del edificio-prueba con daño con respecto al edificio sin daño en los diferentes niveles  $h_0$ - $h_5$ .

La diferencia porcentual de la desviación estándar de la fase del edificio-prueba reparado con respecto al edificio-prueba sin daño se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Diferencias porcentuales de la desviación estándar de la fase del edificio-prueba con reparado con respecto al edificio-prueba sin daño.

Nivel	Diferencia porcentual de la desviacion estandar de la fase
h5	0 %
h4	0 %
h3	<b>20 %</b>
h2	<b>16 %</b>
h1	<b>46 %</b>
ho	<b>209 %</b>

En los resultados (Tabla 9), se observa que la diferencia porcentual de la desviación estándar de la fase aumenta en menor cantidad que el aumento correspondiente en el edificio con daño (Tabla 8). Estos resultados concuerdan con el reporte técnico del edificio-prueba de Seible *et,al.*(1992), en donde se cuantifican en un 50% la recuperación de la rigidez en comparación con la rigidez del edificio sin daños.

## 7. Conclusiones

Los registros de vibración ambiental, al igual que los registros de vibración forzada, son adecuados para analizar las propiedades dinámicas de una estructura, siendo más rápido y menos costoso obtener y analizar registros de vibración ambiental que de vibración forzada.

Los cambios observados en las frecuencias de los modos normales del edificio-prueba en sus tres etapas (sin daño, con daño y reparado), confirman la hipótesis de que el daño en un edificio está asociado con la pérdida de 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.

Los cambios observados en la coherencia en los diferentes niveles del edificio-prueba una vez dañado, confirman cualitativamente la hipótesis que cuando un edificio se daña, disminuye la coherencia debido a que aumenta la variancia de la diferencia de fase entre los pisos o niveles consecutivos, debido a su vez a la pérdida de rigidez del edificio.

Las Técnicas de Identificación de Sistemas (TIS) y de Descomposición en Valores Singulares de los registros de vibración ambiental, son adecuadas para determinar las formas modales de un edificio. Cabe hacer notar que para poder determinar la integridad estructural de un edificio, es necesario un monitoreo periódico de sus vibraciones con la finalidad de detectar cambios en sus formas modales, ya sea por causas naturales como una solicitud sísmica, fuertes vientos o simplemente por tiempo de vida.

## Bibliografía

Bendat, J.S., and Piersol, A.G., 1971. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. Wiley, New York. 407 p.

Igarashi A., F. Seible, G. Hegemier, M.J.N. Priestley, 1994. The U.S.-TCCMAR Full-Scale Five-Story Masonry Research Building Test. Part III – Seismic Load Simulation. Report No. SSRP-94/03. Department of Applied Mechanics and Engineering Sciences, University of California, San Diego. 152 pp.

Ivanovic, S.S., Trifunac, M.D., & Todorovska, M.I. (2000). Ambient vibration tests of structures: a review. *Bulletin of Indian Society of Earthquake Technology* 37(4): 165-197.

Kingsley G., F. Seible, M.J.N. Priestley, G.A. Hegemier, 1994. The U.S.-TCCMAR Full-Scale Five-Story Masonry Research Building Test. Part II – Design, Construction & Test Results. Report No. SSRP-94/02. Department of Applied Mechanics and Engineering Sciences, University of California, San Diego. 268 pp.

Kürkchübasche A.G., F. Seible, G.A. Hegemier, M.J.N. Priestley, G.R. Kingsley, 1994. The U.S.-TCCMAR Full-Scale Five-Story Masonry Research Building Test. Part IV – Predictive and Diagnostic Analyses. Report No. SSRP-94/04. Department of Applied Mechanics and Engineering Sciences, University of California, San Diego. 243 pp.

Lord, J.-F., Ventura, C.E., and Dascotte, E (2004). *Automated model updating using ambient vibration data from a 48-storey building in Vancouver*. In Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Modal Analysis Conference (IMAC XXII), Detroit, Michigan. January, 2004.

Lynch J.P. and K.J. Loh, 2006. A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. *The Shock and Vibration Digest*, 38; 91. DOI: 10.1177/0583102406061499.

Mendoza L., A. Reyes, J. E. Luco, 1991. Ambient Vibration Tests of the Mexicali General Hospital. *Earthquake Spectra*, V. 7, 2, pp. 281-300.

Nigbor R., 1992. Accurate characterization of low-level vibration environments using seismological sensors and systems. *Proc. SPIE*, 1619 (265): DOI:10.1117/12.56845.

Ruiz, M., Ramirez, M., and Iglesias, J.(2000). *A study of the variation of the dynamic properties of a building during seismic retrofit*. In Proceedings of the Fourteenth Engineering Mechanics Conference, American Society of Civil Engineers, Austin, Texas. May 21-24.

Seible F., G.A. Hegemier, M.J.N. Priestley, G. Kingsley, A. Kürkchübasche, A. Igarashi, and J. Weeks, 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.

Strang G., 1998. Introduction to Linear Algebra, 2<sup>nd</sup> Edition. ISBN 0-9614088-5-5, Wellesley-Cambridge Press, 503 pp.

Tischer, H., Marulanda, J., and Thomson, P. (2006). Efecto del reforzamiento sismo-resistente sobre el comportamiento dinámico de una edificación afectada por el sismo de Pizarro. *Ingeniería y Competitividad* 8(2): 101-111.

Weeks J., F. Seible, G. Hegemier, M.J.N. Priestley, 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.

Yamane T., 1973. Estadística. Oxford University Press-Harla México, ISBN 968-6199-38-1, Tercera Edición, 771pp.

## **Apéndice A**

### **Análisis del edificio-prueba, pared de reacción y Azotea del laboratorio Charles Lee Powell (UCSD)**

El objetivo de esta prueba es identificar las frecuencias características del edificio-prueba, 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-prueba. En este caso solo se utilizaron las observaciones de vibración ambiental.

#### **A.1 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, solamente se colocaron cuatro sensores de una componente horizontal en el nivel 4 del edificio-prueba 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 A1.

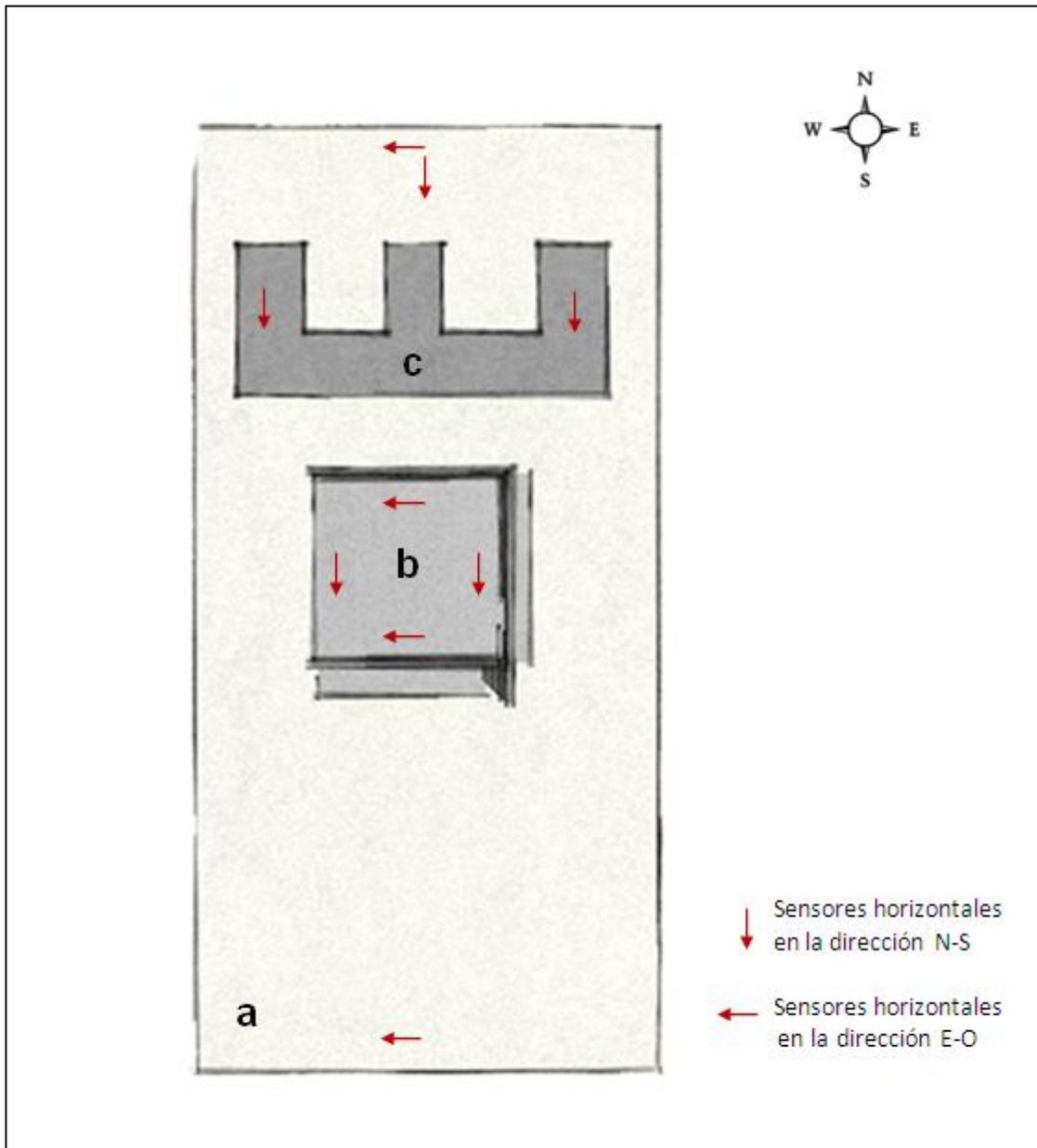


Figura A1. Localización de sensores. Vista en planta: **a.** Azotea del Laboratorio Charles Lee Powell, **b.** edificio prueba y **c.** pared de reacción.

## A.2 Identificación de Frecuencias características

Los espectros resultantes de la vibración ambiental en las tres estructuras se muestran en la Figura A2 (a, b, c):

- 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 A2a), 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-prueba (Figura A2b), 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 sección 3.1, en donde se identifican las frecuencias características del edificio-prueba sin daño.
- En la pared de reacción, al igual que en el edificio-prueba, encontramos energía en la banda de frecuencia entre 7 Hz y 8 Hz (Figura A2c). Sin embargo, en contraste con el edificio-prueba, las oscilaciones son de menor amplitud y la pared de reacción oscila naturalmente en la dirección Norte-Sur, mientras que el edificio-prueba 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-prueba ya que por su diseño, la frecuencia natural de oscilación de la pared de reacción es muy alta.

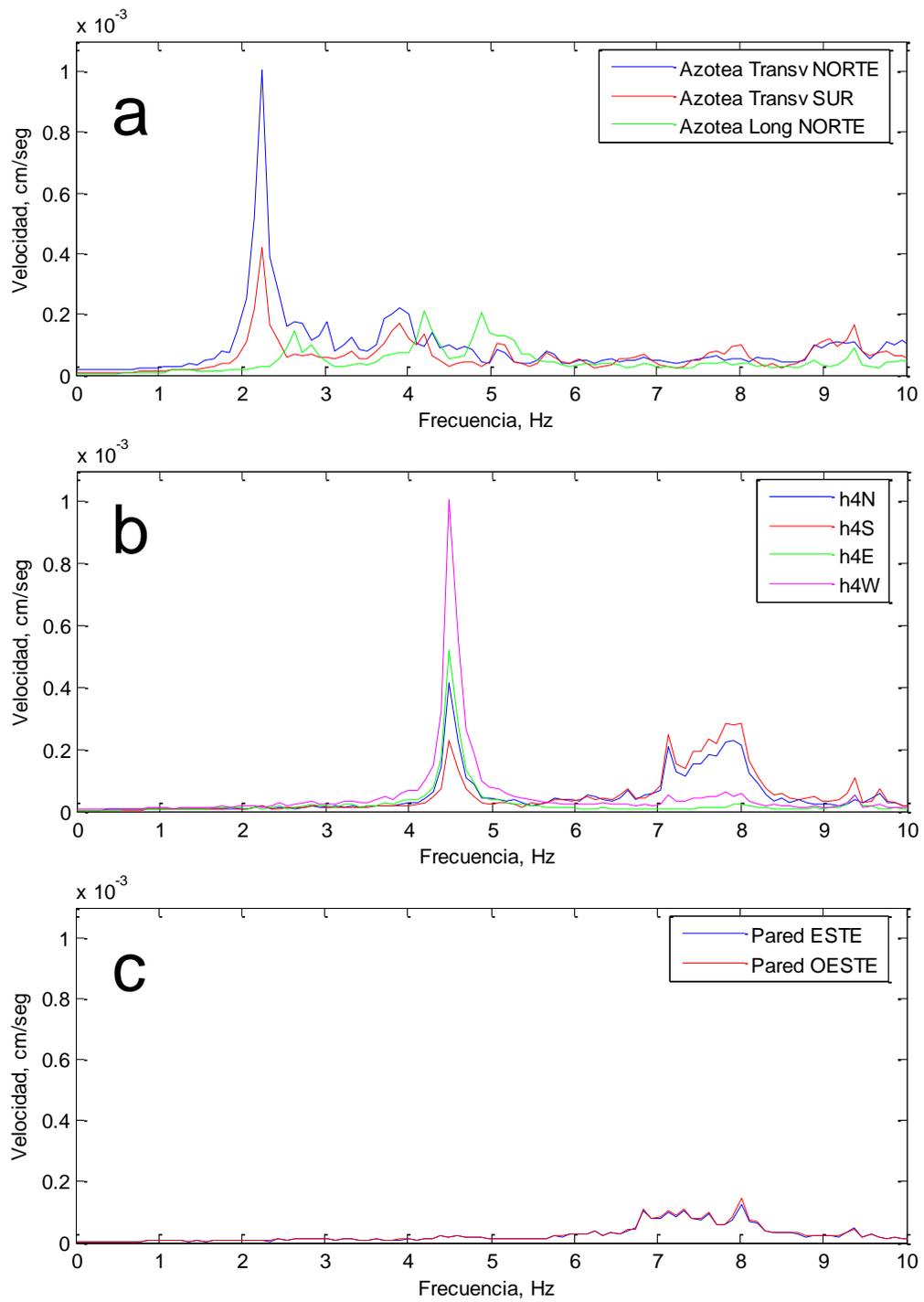


Figura A2. **a.** Azotea del laboratorio James Powell. **b.** Edificio-prueba. **c.** Pared de reacción.

## Apéndice B

### **Series de Tiempo (arreglo de sismogramas), Descomposición Espectral, Análisis de Componentes Principales y Descomposición en Valores Singulares**

Sea un conjunto de sismogramas que resultan de un arreglo de sensores distribuidos espacialmente y de componentes horizontales. En este caso, los instrumentos están distribuidos en los diferentes niveles del edificio (Figura 14). El conjunto de sismogramas se disponen en una matriz  $A$ ; cada columna es un sismograma de acuerdo a un orden que proviene de la distribución espacial/componentes de los sensores. Así las filas indican tiempo y las columnas la posición/componente. En general, las series de tiempo están referidas a su promedio; la normalización para pasar de covariancias a correlación produce un re-escalamiento que ayuda a la interpretación.

La motivación proviene de la necesidad de compactar la información más significativa que está detrás de estas observaciones. Esto implica eliminar (filtrar) la parte redundante y el ruido; en la reducción, generalmente quedan sólo unas pocas componentes realmente significativas de la base de datos; es decir, las que contienen la parte mayor de la información. Los resultados pueden compararse con los que se obtienen al aplicar transformadas de Fourier y la comparación correspondiente de espectros. En vez de utilizar las funciones-bases de la transformada de Fourier (senos/cosenos o exponenciales complejos), obtenemos funciones-bases de los datos mismos; es decir funciones empíricas ortogonales. Este método alternativo aplica el análisis espectral basado en la Descomposición en Valores Característicos (DVC) y la Descomposición en Valores Singulares (DVS) de la matriz  $A$ . Podemos explorar dos opciones: a) aplicar la DVS y elegir aquellas componentes que parezcan más importantes; b) utilizar el método

estándar de “componentes principales” que existe en la literatura, aunque su uso para series de tiempo no es de uso extendido (Yamane, 1973). Lo que sigue se refiere a la segunda opción.

**Justificación del Método.** La matriz original con la base de datos es  $A$ . Ya que la covariancia (o correlación) de las series de tiempo es, por definición, función del desplazamiento o retraso (“lag”, en Inglés); simplificamos y la covariancia estimada para pares de series de tiempo tiene retraso nulo. De este modo, resulta una matriz que es simétrica y cuyos elementos son los pares de productos escalares de las columnas de  $A$ . Así, resulta que esta matriz de covariancias estimadas que utilizamos en este trabajo es  $C_A = A^T A$ .

Cada componente principal es una combinación lineal de los datos originales (columnas de la matriz  $A$ ); los coeficientes correspondientes se almacenan como columnas de la matriz  $V$ , donde la primera columna corresponde a los coeficientes que forman la primera componente principal, etc. De ahí, resulta que la transformación para la primera componente es  $Av_1$  y, en forma compacta, para todas las componentes principales  $AV$ . Por lo tanto, podemos calcular a  $C_V$ , la matriz de covariancias de las variables transformadas (de las componentes principales), como:

$$C_V = (AV)^T (AV) = V^T C_A V \quad (1)$$

Agregamos la condición de que los vectores-coeficientes son ortogonales entre sí (independencia; no-redundancia) y que su norma valga 1 (para acotar la variancia). Luego, solicitamos que la primera componente principal tenga variancia máxima. Esto produce el siguiente problema de optimización

$$\max\{v_1^T C_A v_1\} \quad \text{sujeto a } v_1^T v_1 = 1 \quad (2)$$

La inclusión del coeficiente de Lagrange  $\lambda_1^2$  produce el problema

$$\max\{v_i^T C_A v_1 - \lambda_1^2 (v_1^T v_1 - 1)\} \quad (3)$$

Al derivar e igualar a cero, resulta

$$\frac{\partial}{\partial v_1} \{v_i^T C_A v_1 - \lambda_1^2 (v_1^T v_1 - 1)\} = 2(C_A - \lambda_1^2)v_1 = 0$$

La solución de esta ecuación corresponde a la de un problema de valores característicos

$$C_A v_1 = \lambda_1^2 v_1 \quad (4)$$

Lo anterior se puede iterar con la condición adicional (implícitamente satisfecha) de que los vectores de coeficientes correspondientes a la segunda, tercera, ...componente principal sean ortogonales entre sí. En resumen, la solución de maximizar la variancia consecutivamente produce también consecutivamente el problema (4) para cada uno de los valores característicos. En el proceso iterativo; la variancia es menor que la anteriormente calculada, pero máxima respecto a los siguientes. El criterio de elección de las primeras  $p$  componentes principales se basa en acumular la mayor parte de la variancia; esto justifica el uso de la DVC truncada, el núcleo del método.

$$A^T A = V_p \Lambda_p^2 V_p^T = \sum_{i=1}^p \lambda_i^2 v_i v_i^T. \quad (5)$$

En la práctica, elegimos las primeras  $p$  componentes porque representan el 70% u 80% de la variación total, medido por la suma de los primero  $p$  valores de  $\lambda_i^2$ . La interpretación de cada componente principal resulta del vector característico  $v_i$  correspondiente a  $\lambda_i^2$ . En lo anterior, distinguimos el valor característico  $\lambda_i^2$  del valor singular  $\lambda_1$  de la DVS (Strang G., 1988)

$$A = U \Lambda V^T \quad (6)$$

o, alternativamente, en la versión truncada,

$$A = \sum_{i=1}^p \lambda_i u_i v_i^T \quad (7)$$

**Esquema del Método.** El método se compone de los siguientes pasos: a) se estima la covariancia o correlación de las series de tiempo con retraso nulo  $A^T A$ ; b) se aplica la DVC a esta matriz simétrica; c) los valores característicos se interpretan como las variancias asociadas a cada componente espectral (la justificación está al final de esta Nota); se eligen aquellos que representan la mayor parte (70% a 80%) de la variabilidad total, medida por la suma de los valores principales; d) utilizamos los vectores característicos para interpretar el significado empírico de cada componente.

Ya justificamos el uso de la matriz de covariancias estimadas  $A^T A$ ; la descomposición espectral en que está basado el método es la expresión (5)

$$A^T A = V_p \Lambda_p^2 V_p^T = \sum_{i=1}^p \lambda_i^2 v_i v_i^T \quad (5)$$

Para resumir el contenido de (4) y (5), los vectores singulares o característicos son vectores-columnas; ellos están normalizados con longitud 1 y son ortogonales. La ortogonalidad implica que no hay redundancia entre las diferentes componentes; es decir, ellas son independientes. Cada eje del sistema de coordenadas “principal” tiene la dirección de cada vector característico que, a su vez, es una combinación lineal de las mediciones. La variancia de cada componente es máxima con respecto a la información no procesada en las componentes anteriores.

Finalmente, justifiquemos que la variancia de cada componente principal es el valor característico  $\lambda_i^2$  correspondiente. Para ello, tomamos (1) y le aplicamos la DVC, lo que produce, aplicando ortogonalidad,

$$C_V = V^T C_A V = V^T A^T A V = V^T V \Lambda^2 V^T V = \Lambda^2 \quad (8)$$

Con lo que queda demostrado lo enunciado.

Este apéndice se basa principalmente en las notas del Curso Análisis de Datos 2010, que imparte el Profesor José Frez Cárdenas, en el Departamento de Sismología del CICESE.