

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

En los estudios de vibración ambiental para la evaluación del periodo fundamental de los edificios se acostumbra a realizar medidas simultáneas de aceleraciones en la azotea y en la base de estructuras regulares, posteriormente se calcula la función de transferencia del edificio y se identifica el periodo. Una manera de evaluar la función de transferencia es mediante la función de coherencia, que en una medición ideal debe ser igual a la unidad (Amini, 1990). Por esta razón, Muriá-Vila y González (1995) recomiendan que, para identificar las frecuencias naturales de vibración se utilicen las funciones de transferencia y coherencia, y mencionan que podrían cometerse errores importantes si se analizan exclusivamente los espectros de Fourier, debido a la presencia de otras ordenadas espectrales que pueden ser significativas pero ajenas a las frecuencias naturales del edificio. Es decir, pueden incluir valores asociados a vibraciones de estructuras vecinas, de equipos electromecánicos u otras fuentes artificiales de ruido. En este trabajo veremos que, en entornos urbanos, en los que es difícil controlar todas las entradas de acciones dinámicas sobre los edificios y que, por tanto, es difícil hallar la función de transferencia mediante el típico cociente entre la entrada y la salida, para obtener una estimación del periodo fundamental de edificios suele ser suficiente utilizar el espectro de Fourier de la acción medida en la parte superior de las estructuras. El método es rápido, fácil de aplicar y económico permitiendo realizar una gran cantidad de medidas en poco tiempo.

#### 3.1 MÉTODO PROPUESTO

Se aprovecha la vibración ambiental o ruido cultural como fuente de excitación de los edificios y se utiliza un equipo de un canal para medir la aceleración en la parte superior o azotea midiéndose la aceleración en las direcciones longitudinal y transversal (Figura 3.1).

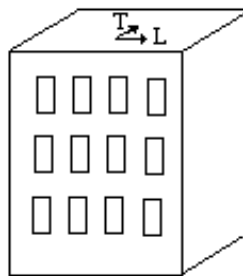
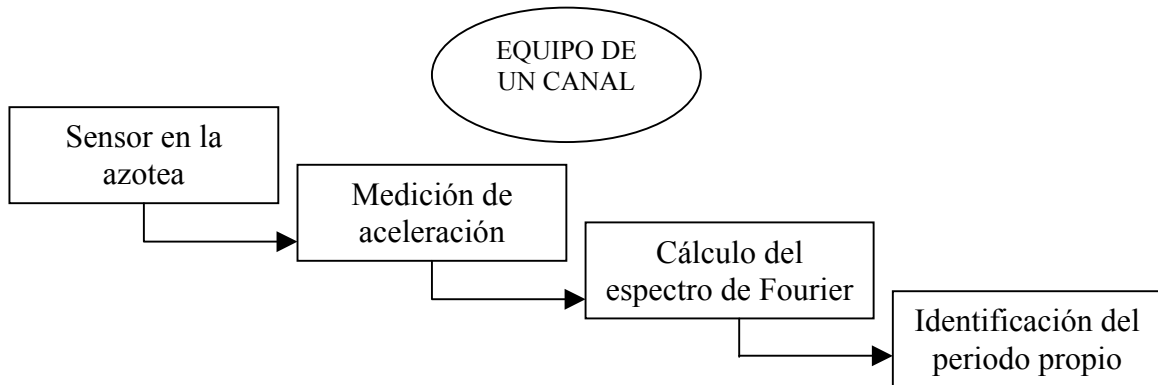


Figura 3.1 Esquema de un edificio y de las direcciones de medición.

En el espectro de Fourier de la aceleración medida se suele identificar el periodo fundamental del edificio, como el de máxima amplitud espectral de menor frecuencia que se halla dentro del intervalo de frecuencias propias posibles del edificio. El diagrama siguiente esquematiza el procedimiento seguido.



El método que aquí se propone, ha nacido de la observación sistemática de espectros de señales registradas en la parte superior de los edificios y se ha validado con tres estudios:

- Modelo de laboratorio de una estructura de acero
- Medición del edificio EH con equipo de nueve canales.
- Medición de 22 edificios en Adra con equipo de dos canales.

### 3.2 PROCESADO

Se suele considerar que un edificio es un sistema sujeto a una señal de entrada  $x(t)$  o excitación a la que responde con una función de salida  $y(t)$ . Estas dos funciones permiten caracterizar de forma completa la estructura. Se dice que el sistema es lineal cuando la respuesta a una excitación

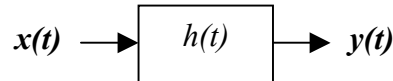
$$\mathbf{x} = a_1 x_1 + a_2 x_2$$

es

$$\mathbf{y} = a_1 y_1 + a_2 y_2$$

donde  $y_1$  e  $y_2$  son las respuestas a  $x_1$  y  $x_2$ , respectivamente, y  $a_1$  y  $a_2$  son constantes (Hsu, 1993; Balmer, 1998). Por tanto, en un sistema lineal existe el principio de superposición y en la salida están combinados un conjunto de  $n$  modos de vibración siendo el más relevante el modo fundamental. La aportación de cada modo decrece en importancia gradualmente de tal manera que la Norma Sísmica Española sólo considera necesario para el cálculo estructural, como máximo los 3 primeros modos dependiendo del valor del periodo fundamental (AE-88, 1996).

Así, de acuerdo con la teoría de sistemas lineales, una estructura suele modelarse como un oscilador lineal de varios grados de libertad que recibe una señal de entrada  $x(t)$  en el primer nivel y la transforma en una señal de salida  $y(t)$  en la última planta y, por lo tanto, se considera como un sistema caracterizado por su función de transferencia  $H(\omega)$ , que, típicamente, se estima por el cociente espectral entra la salida y la entrada.



siendo su expresión matemática en el dominio de la frecuencia

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)}$$

donde  $X(\omega)$  e  $Y(\omega)$  son las transformadas de Fourier de las señales  $x(t)$  e  $y(t)$  respectivamente y  $H(\omega)$  la transformada de Fourier de la función de transferencia  $h(t)$ . Las mediciones experimentales de estas señales incluyen ruido, tanto en la entrada como en la salida, lo que dificulta el cálculo de la función de transferencia.

Amini (1990) compara diferentes estimadores de la función de transferencia  $H(\omega)$ . En este trabajo se utilizan las funciones  $H1$  y  $H2$  descritas también por Ewins (1994) y en el Instruction Manual 2515 (1989).  $H1$  y  $H2$  se definen como:

$$H1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad H2 = \frac{S_{yy}}{S_{yx}}$$

donde  $S_{xx}$  es el autoespectro de la entrada,  $S_{yy}$  es el autoespectro de la salida y  $S_{xy}$  es el espectro cruzado.  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  y  $S_{xy}$  se definen mediante las transformadas de Fourier de las funciones de autocorrelación y correlación cruzada:

$$S_{xx} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$S_{yy} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{yy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$S_{xy} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

De acuerdo con estas definiciones y a través de un proceso de promediado para reducir el ruido,  $H1$  es un buen estimador de la función de transferencia cuando sólo hay ruido en la salida mientras que  $H2$  es un buen estimador cuando el ruido sólo aparece en la entrada (Instruction Manual 2515, 1989). Cuando existe ruido en la entrada y en la salida es difícil determinar  $H(\omega)$  sin un conocimiento del ruido de entrada (Bendat y Piersol, 1986).

Para evaluar la fiabilidad de la función de transferencia se acostumbra a usar la función de coherencia ( $\gamma^2$ ) que se obtiene a partir de las expresiones:

$$\gamma^2 = \frac{H_1}{H_2} \quad \text{o} \quad \gamma^2 = \frac{|S_{xy}|^2}{S_{xx}S_{yy}}$$

y expresa a cualquier frecuencia la cantidad de relación lineal entre las señales de entrada y salida. Para un sistema lineal con una sola entrada y salida, la función de coherencia es la unidad y si  $x(t)$  e  $y(t)$  son completamente independientes, entonces su valor es cero. Si su valor está entre cero y la unidad es posible que se den una o más de las siguientes situaciones (Bendat y Piersol, 1986):

1. Ruido extraño en las mediciones.
2. El sistema que relaciona a  $x(t)$  e  $y(t)$  no es lineal.
3. La salida  $y(t)$  se debe a  $x(t)$  y a otras entradas.

Los datos medidos deben ser promediados para eliminar las componentes aleatorias del movimiento (Nigbor et al, 1992). Existen dos consideraciones que determinan el número de promedios requeridos y son la confiabilidad estadística y la supresión de las señales espurias (Ewins, 1994).

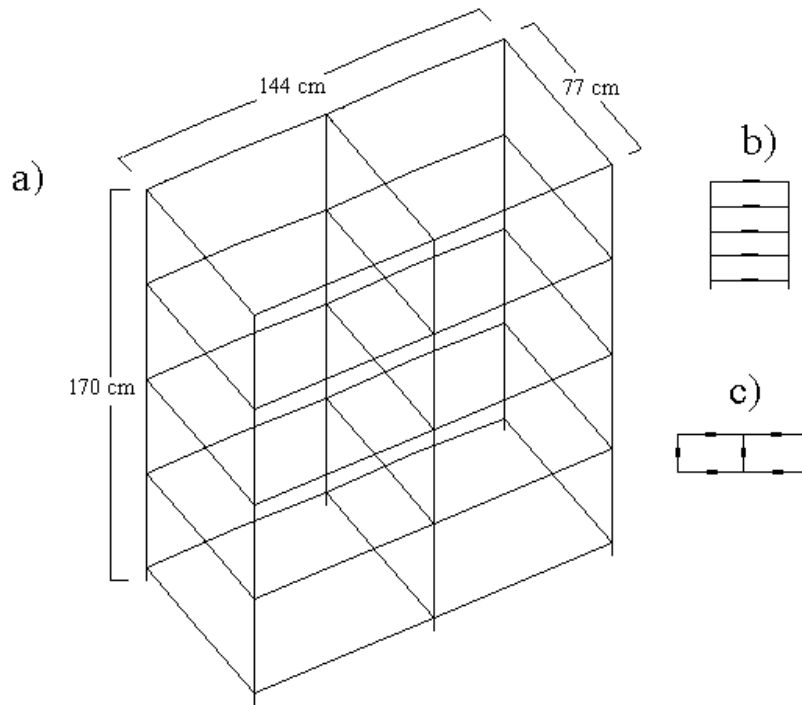
Durante la mayor parte del trabajo de campo se utilizó un analizador-registrador de señal (Figura 2.2) que permitió el análisis en tiempo real del promedio del espectro de Fourier observándose que la estabilización ocurría generalmente con promedios de entre 5 y 10 adquisiciones y que se requería, para identificar el periodo fundamental, un mayor número de medidas en edificios de mampostería que en estructuras de hormigón armado.

### **3.3 MODELO DE LABORATORIO**

#### **3.3.1 Descripción del modelo**

En el laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Escuela de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Barcelona de la UPC, se construyó un modelo físico de una estructura de acero de cuatro plantas. Esta estructura se analiza en este trabajo para evaluar los diferentes métodos de estimación de la función de transferencia de edificios.

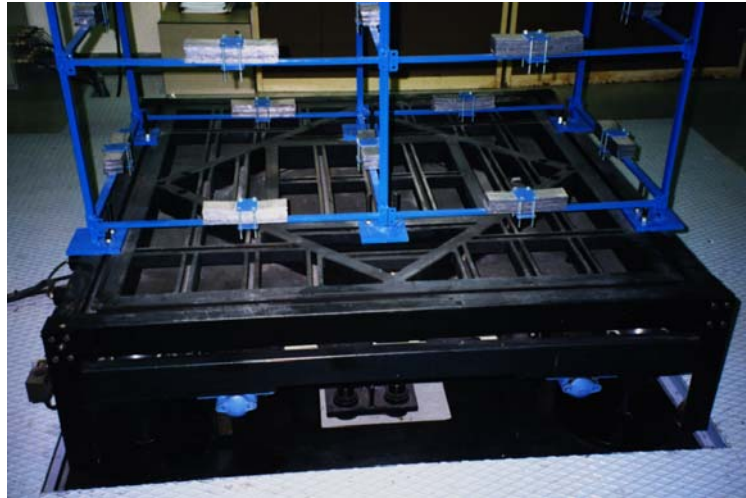
Las dimensiones de la estructura son 144 cm de largo, 77 cm de ancho y 170 cm de altura (Figuras 3.2 y 3.3). Está colocada sobre una mesa vibratoria cuadrada de 1.5 m de lado con movimiento en las tres direcciones (Figuras 3.3 y 3.4).



**Figura 3.2** a) Estructura aporricada de acero. En b) y c) se presentan secciones en elevación lateral y en planta. Se simularon las cargas de las losas de entrepiso, mediante bloques de plomo fijados en la mitad de cada viga.

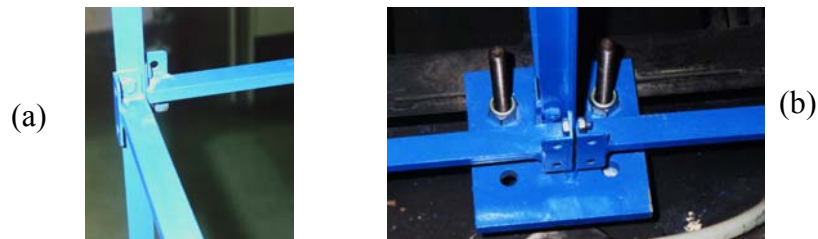


**Figura 3.3** Fotografía del modelo utilizado en el laboratorio y de la mesa vibradora.



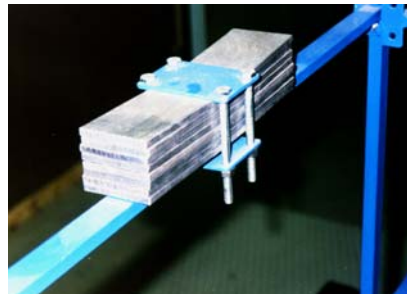
**Figura 3.4** Fotografía de la mesa vibradora.

Las columnas están construidas con perfil laminado en forma de L de 20x20x2 mm y las vigas son barras rectangulares de 20x10 mm, ambas, columnas y vigas, son de acero F111 y se unen mediante soldadura y tornillos (Figura 3.5).



**Figura 3.5** Detalles de las uniones viga-columna (a) y de las uniones de la estructura a la base (b).

Para simular las masas concentradas de las losas de entrepiso se utilizan paquetes de ocho barras de plomo de 20 cm de longitud y 4.5 kg de peso, cada paquete, fijados en la parte central de cada viga con una placa y cuatro tornillos (Figura 3.6).



**Figura 3.6** Fotografía de un paquete de barras de plomo fijado a una viga.

Se ha analizado la respuesta del modelo a un impulso y a vibración ambiental y se ha efectuado la simulación numérica mediante el programa de elementos finitos

SAP90. Los resultados obtenidos con el estudio experimental se comparan con los obtenidos a partir del modelado matemático de la estructura.

### 3.3.2 Análisis mediante modelado numérico

La estructura tiene 36 nodos, los 6 de la base están restringidos sin movimiento translacional ni rotacional, tiene 30 elementos columna, 35 elementos viga y se hace un análisis considerando 10 modos de vibración. El periodo fundamental obtenido mediante el modelado matemático es de 0.37 s (2.72 Hz).

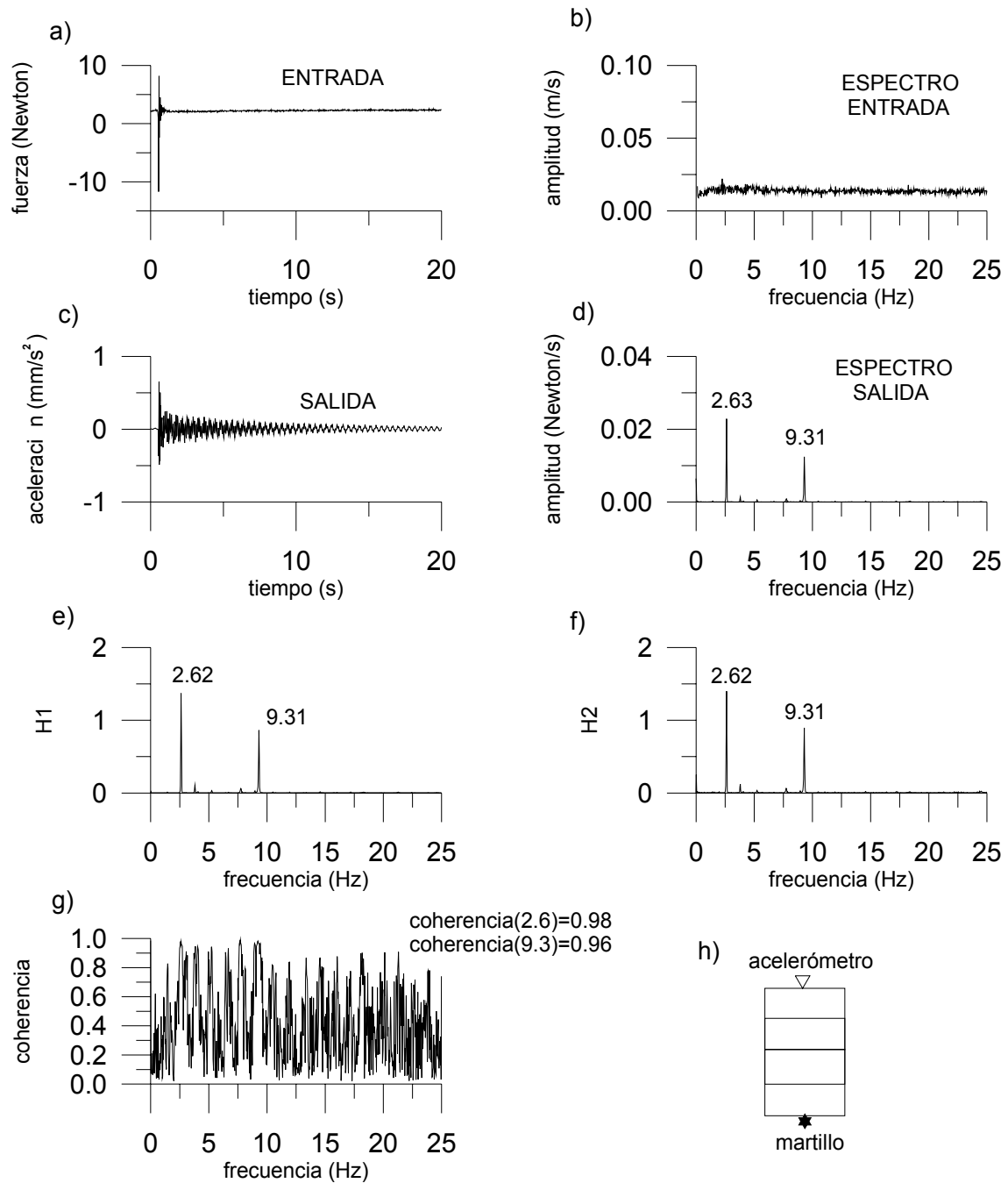
### 3.3.3 Análisis con impulsos y vibración ambiental

En los dos tipos de pruebas los sensores se fijaron a las vigas metálicas de la estructura mediante imanes (atracción magnética). En el análisis de la estructura por impulsos, ésta se excitó con golpes de martillo. En la Figura 3.7 se presenta un esquema del experimento (Figura 3.7 h) y de la entrada, salida y respuesta para el caso de impacto en la parte central de la base. Tanto en el espectro de Fourier de la aceleración medida en la parte superior como en las funciones de transferencia  $H1$  y  $H2$ , se identifican claramente las frecuencias de los primeros dos modos de vibración, 2.6 y 9.3 Hz. La función de coherencia en estas frecuencias da valores de 0.98 y 0.96, respectivamente, indicando una buena fiabilidad de los resultados obtenidos (Figura 3.7 g).

En el Anexo 3.1 se presenta la respuesta del modelo a impactos en la parte lateral de la base y en la parte lateral del último nivel. Se observa que aparecen las frecuencias de translación inicialmente identificadas y las frecuencias de torsión. Al efectuarse el golpe del martillo en la parte lateral y superior de la estructura se favorece la excitación de los modos de translación (principalmente el fundamental) sobre los de rotación. *(En este tipo de pruebas conviene aplicar el impulso en un lugar de la estructura que excite el modo de vibración a medir).*

En todos los casos, la coherencia tiene valores altos para las frecuencias identificadas lo cual demuestra la fiabilidad de las funciones de transferencia así obtenidas. Las frecuencias observadas en el espectro de Fourier de la aceleración medida en la parte superior de la estructura coinciden con las determinadas a partir de las funciones de transferencia.

En las Figuras 3.8 y 3.9 se muestran los resultados de las pruebas realizadas con vibración ambiental. Al utilizarse una señal con aceleración pico de  $1\text{mm/s}^2$  (Figura 3.8) se observa que la frecuencia del modo fundamental no se detecta en las funciones de transferencia debido posiblemente a que en ese intervalo de frecuencias la entrada (en la base) no excita a la estructura como lo muestran los bajos valores de la función de coherencia. Si sólo se hubiera hecho esta prueba (con aceleración pico de  $1\text{mm/s}^2$ ) seguramente se hubiera tenido el error de considerar la frecuencia fundamental de la estructura como 9.44 Hz que aporta la función de transferencia  $H1$ , frecuencia para la cual el valor de coherencia es casi la unidad.

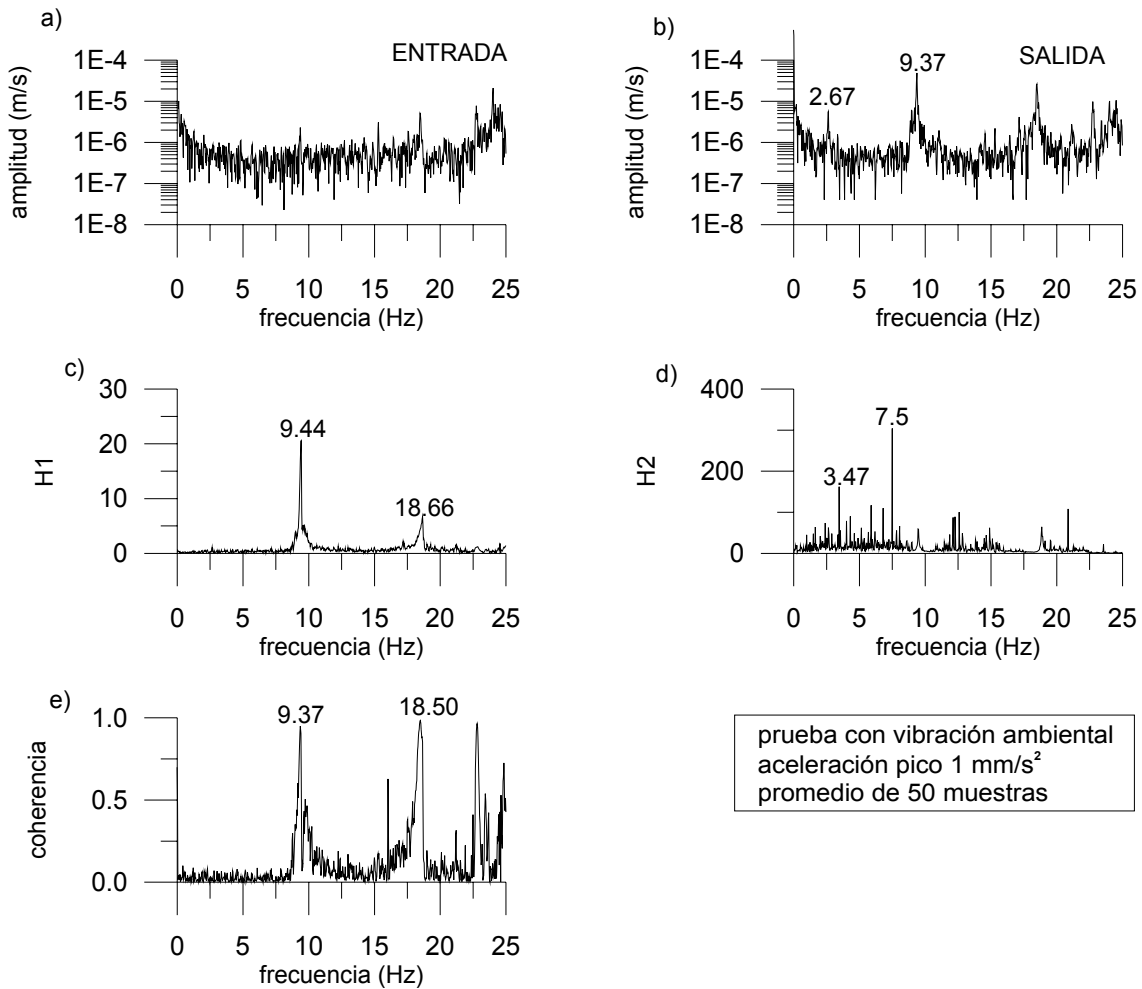


**Figura 3.7** Respuesta de la estructura metálica a un impulso (a) producido por un martillo que la golpea (h) en la parte central de su base. La respuesta en aceleración se muestra en (c) y los espectros de Fourier de la entrada y la salida en (b) y (d) mientras que (e) y (f) representan las funciones de transferencia H1 y H2, respectivamente. La función de coherencia (g) se evalúa en las dos frecuencias identificadas.

En el ensayo mostrado en la Figura 3.9, se utilizó una señal más energética, con una aceleración pico de  $20 \text{ mm/s}^2$ , y la frecuencia fundamental se identifica claramente en el espectro de Fourier de la señal registrada en la parte superior. Es decir, para



identificar la frecuencia del modo fundamental es necesario tener señales de mayor amplitud y para señales de amplitud baja es más eficiente el análisis del espectro de Fourier de la aceleración medida en la parte superior.

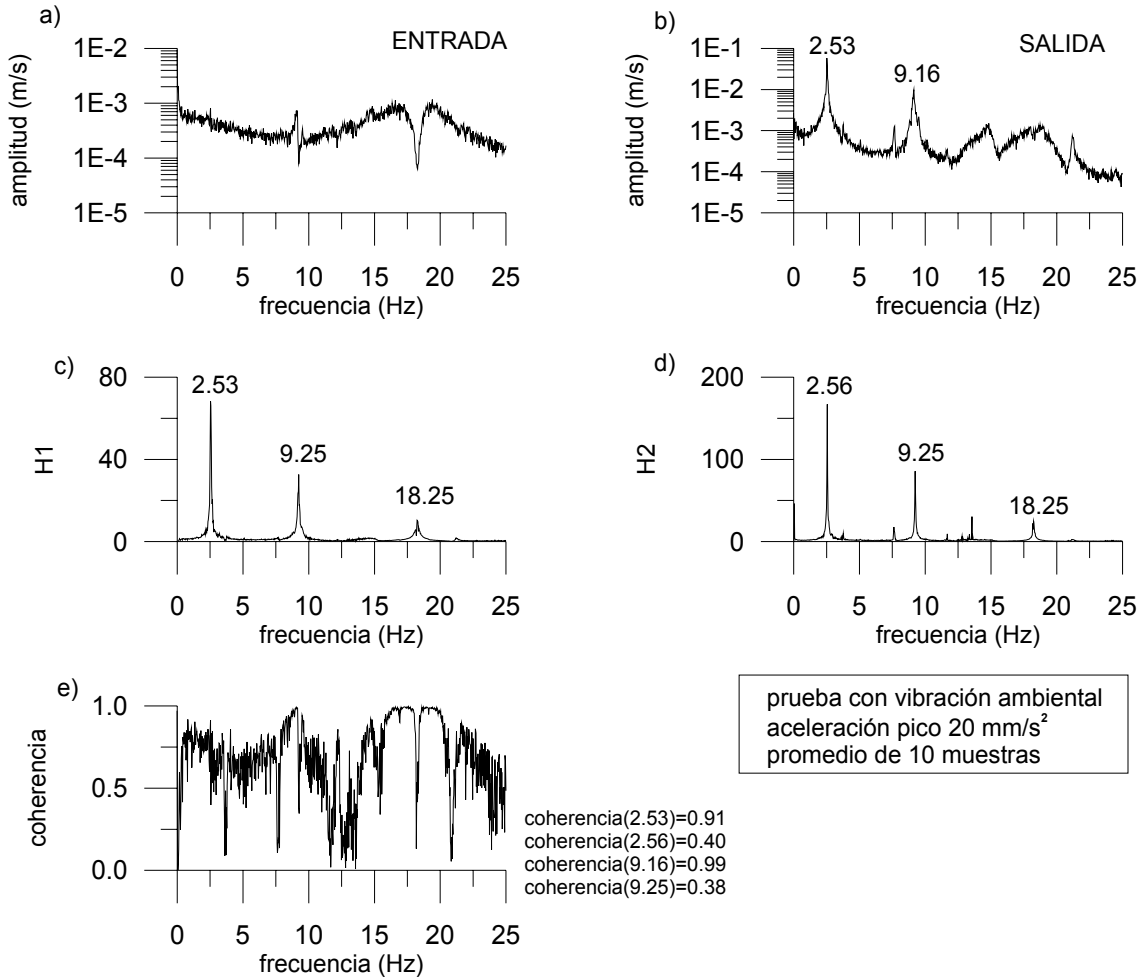


**Figura 3.8** Identificación de las frecuencias propias de vibración de la estructura metálica utilizando ruido ambiental con aceleración pico de  $1 \text{ mm/s}^2$ . El espectro de Fourier de la señal de entrada se muestra en (a) y en (b) el espectro de Fourier de la aceleración medida en la parte superior. Las funciones de transferencia H1 (c) y H2 (d) no muestran la frecuencia fundamental y la función de coherencia (e) presenta bajos valores en la región donde se localiza dicha frecuencia fundamental.

La frecuencia fundamental del modelo a escala construido en el laboratorio identificada con diferentes pruebas se presenta en la Tabla 3.1. Hay una buena concordancia entre los valores obtenidos existiendo una discrepancia del 7.5% entre los valores mínimo y máximo.

Cuando la aceleración en la base es muy baja ( $1 \text{ mm/s}^2$ ) el modo fundamental no se identifica mediante ninguna de las dos funciones de transferencia usadas mientras

que ésta se observa en el espectro de la señal registrada en la parte superior de la estructura (Figura 3.8).



**Figura 3.9** Identificación de las frecuencias propias de vibración de la estructura metálica utilizando ruido ambiental con aceleración pico de  $20 \text{ mm/s}^2$ . El espectro de Fourier de la señal de entrada se muestra en (a) y en (b) el espectro de Fourier de la aceleración medida en la parte superior. Las funciones de transferencia H1 (c) y H2 (d) muestran las frecuencias buscadas y la función de coherencia (e) presenta altos valores para las frecuencias identificadas.

### 3.4 EDIFICIO EH

En el caso del modelo a escala situado sobre una mesa vibrante, la excitación predominante ha sido la proveniente de la base. En los edificios reales en condiciones normales existen tres fuentes principales que generan la vibración: el suelo, el viento y la actividad cultural existente en el interior del edificio. Dependiendo de su uso, de las características del lugar donde está emplazado, del momento del día y de las condiciones meteorológicas prevalecerán unas fuentes u otras. Para el estudio de la

viabilidad del método se utilizó como lugar de ensayo un edificio de 42 niveles (al que se le llamará EH) y se eligieron horas nocturnas para minimizar ruido cultural interior.

	impulso	vibración ambiental		modelo numérico
		$a_p=1 \text{ mm/s}^2$	$a_p=20 \text{ mm/s}^2$	
espectro	2.63Hz (0.38s)	2.67Hz (0.37s)	2.53Hz (0.40s)	2.72Hz (0.37s)
H1	2.62Hz (0.38s)	<i>no identificada</i>	2.53Hz (0.40s)	
H2	2.62Hz (0.38s)	<i>no identificada</i>	2.56Hz (0.39s)	

**Tabla 3.1** Relación de frecuencias fundamentales de la estructura metálica obtenidos con impulsos y vibración ambiental como excitación de entrada y mediante un modelo matemático. Se identifican a partir del espectro de la respuesta en la parte superior de la estructura y mediante las funciones de transferencia H1 y H2. Entre paréntesis se presentan los periodos.

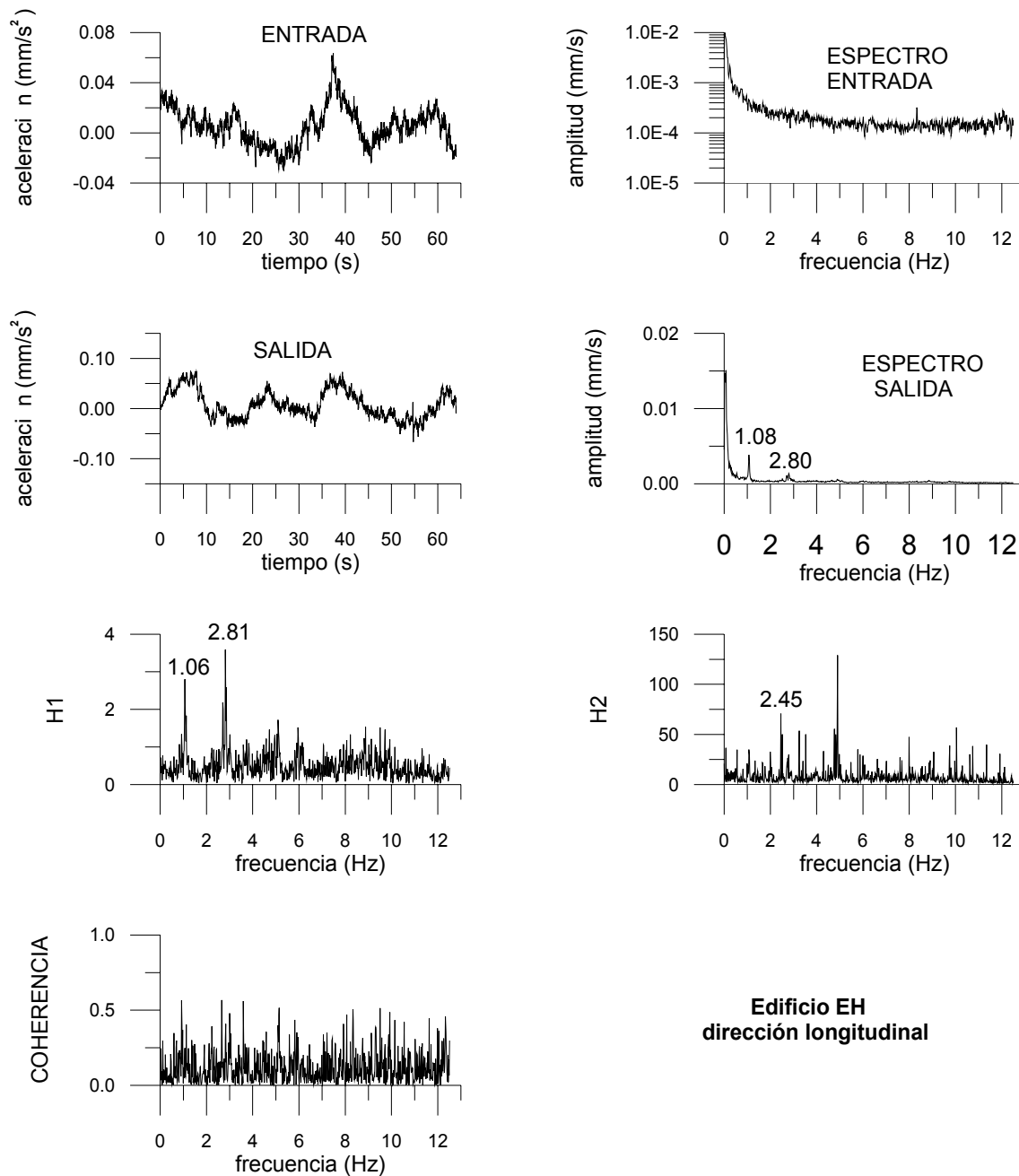
Para realizar las mediciones se utilizaron dos equipos:

1. El registrador en cinta de vídeo de 14 canales TEAC XR-50 con acelerómetros BRÜEL & KJÆR Tipo 4370 colocados en cubos de plástico que se fijaron al suelo del piso mediante una cola adecuada. Los sensores se colocaron en la parte central de los niveles 40 y -3 (sótano) del edificio y se orientaron en las direcciones longitudinal y transversal.
2. El Analizador de Vibraciones BRÜEL & KJÆR Tipo 2515 con el acelerómetro BRÜEL & KJÆR Tipo 8318 montado sobre un cubo metálico. El sensor se colocó en la parte central del nivel 40 del edificio orientándose en las direcciones longitudinal y transversal.

En las Figuras 3.10 y 3.11 se presenta la respuesta del edificio en las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente, con las funciones de transferencia H1 y H2 calculadas considerando como entrada la señal medida en el sótano (nivel -3) y la salida la registrada en el nivel 40. En los espectros de Fourier de la aceleración medida en el nivel 40 se identifican las frecuencias fundamentales en las direcciones longitudinal (1.08 Hz) y transversal (0.86 Hz); valores comparables pueden observarse en la función de transferencia H1, mientras que la función H2 sólo identifica el que corresponde a la dirección transversal. La Tabla 3.2 resume los periodos obtenidos a partir del análisis espectral de la señal registrada en la planta 40, las funciones H1 y H2 y a partir del modelado numérico del edificio. Como se verá próximo capítulo el modelado numérico se efectuó mediante el programa de elementos finitos SAP 90.

	Un canal	Dos canales			Modelo numérico
	Esp. Fourier	Esp. Fourier	H1	H2	
Longitudinal	0.96s (1.04Hz)	0.93s (1.08Hz)	0.94s (1.06Hz)	-----	0.85s (1.18Hz)
Transversal	1.14s (0.88Hz)	1.16s (0.86Hz)	1.14s (0.88Hz)	1.19s (0.84Hz)	1.29s (0.78Hz)

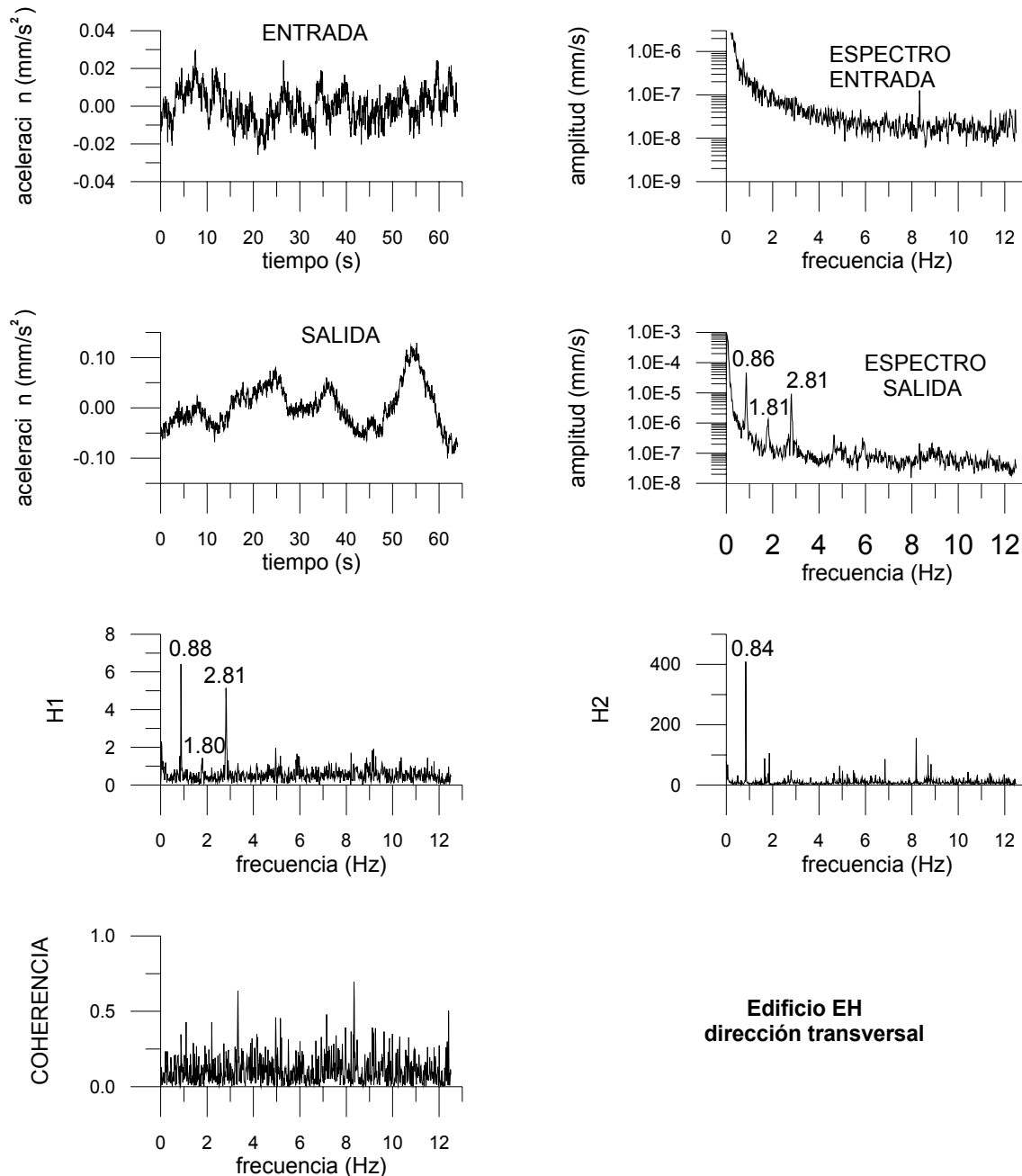
**Tabla 3.2** Periodos (y frecuencias) fundamentales del edificio EH obtenidos a partir de espectros de las señales de ruido registradas en la planta 40 (con dos equipos diferentes), a partir de las funciones de transferencia H1 y H2 y de su modelado numérico.



**Figura 3.10** Respuesta del edificio EH en la dirección longitudinal, medida con las funciones de transferencia, H1 y H2 y el espectro de la aceleración registrada en la planta 40. Además se presenta la función de coherencia entre las señales registradas en la base, en el nivel -3 de sótano (supuestamente la entrada) y en la parte superior, en el nivel 40 (señal de salida).

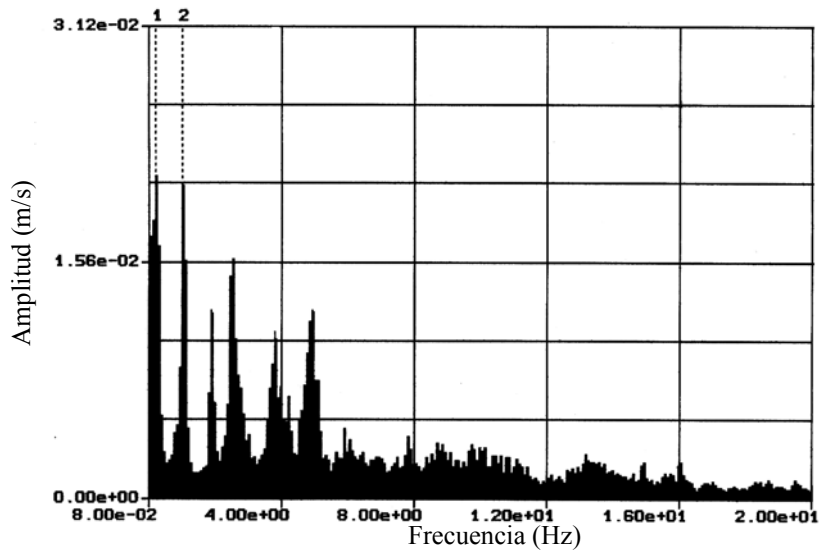
Las dos funciones de transferencia calculadas con las señales medidas en el edificio EH son de escasa fiabilidad dado que la función de coherencia tiene valores sumamente bajos. Probablemente este hecho se debe a que la fuente principal de

excitación del edificio no es la registrada en la base del edificio, existiendo otras fuentes de excitación importantes como por ejemplo viento y/o acciones interiores.

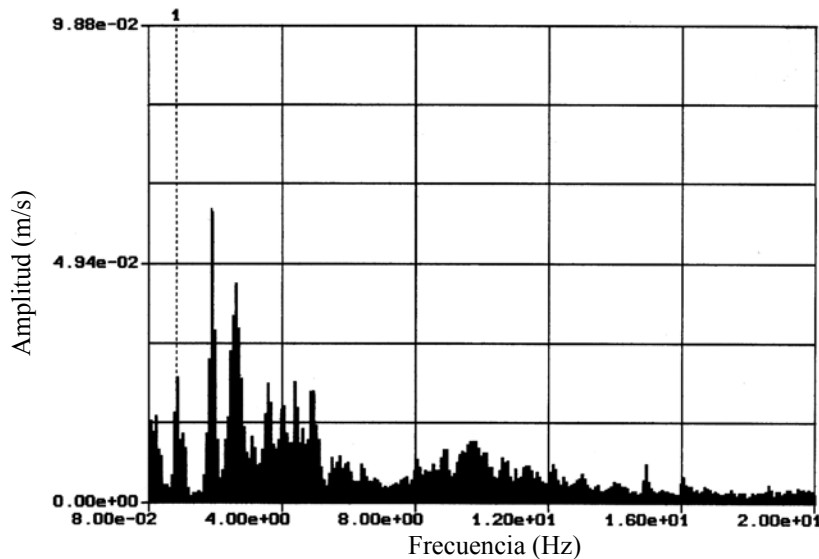


**Figura 3.11** Respuesta del edificio EH medida en la dirección transversal mediante las funciones de transferencia, H1 y H2 y el espectro de la aceleración en la planta 40. Además se presenta la función de coherencia entre las señales registradas en la base, nivel -3 de sótano (supuesta entrada) y en la parte superior, nivel 40 (salida).

En el estudio del edificio EH se efectuaron también medidas de aceleración en las direcciones longitudinal (Figura 3.12) y transversal (Figura 3.13) con el equipo de un canal observándose el periodo fundamental 0.96 s (1.04 Hz) en la dirección longitudinal y 1.14 s (0.88 Hz) en la transversal. Por otra parte, en los espectros de Fourier de las salidas (Figuras 3.10, 3.11 y 3.12) se observa un pico a 0.24 Hz que se encuentra muy cerca del límite inferior de medición del equipo y en una región de bajas frecuencias con ruido de amplitud significativa. Se ha considerado que esta frecuencia es espúrea y no corresponde a una frecuencia propia del edificio.



**Figura 3.12** Espectro de Fourier de la aceleración en la dirección longitudinal, medida en la planta 40 del edificio EH con un equipo de un canal. Los picos 1 y 2 corresponden a las frecuencias de 0.24 y 1.04 Hz, respectivamente.



**Figura 3.13** Espectro de Fourier de la aceleración en la dirección transversal, medida en la planta 40 del edificio EH con un equipo de un canal. El pico señalado corresponde a 0.88 Hz.

En el estudio del edificio EH se observa que, cuando no se tiene seguridad de registrar la señal de entrada correcta, no es necesario ni conveniente el cálculo de la función de transferencia para obtener el periodo fundamental del edificio. En el caso más favorable los resultados obtenidos a partir del análisis del espectro de Fourier de la señal registrada en la parte superior del edificio, coinciden con los obtenidos a partir del cálculo de la función de transferencia. La coherencia entre las señales involucradas en la medida de la función de transferencia es un buen indicador de su bondad.

Este hecho hace innecesario el uso de técnicas multicanal cuando sólo se persigue identificar los períodos propios de vibración de un edificio, lo que supone un ahorro en equipos, en tiempo para la disposición de los sensores e instrumentos, y en el procesado de las señales registradas. En el caso del edificio EH se tendió cable a lo largo de toda la estructura, más de 120 metros; para ello fue necesario habilitar un conducto vertical en el núcleo del edificio que posteriormente se hubo de reparar.

### **3.5 Estudio en la ciudad de Adra (Almería)**

En Junio de 1998 se realizó una campaña para medir los periodos fundamentales de 22 edificios de la ciudad de Adra (Almería). Para ello se utilizó el equipo de un canal de Barcelona y el equipo de tres canales del grupo de Ingeniería sísmica de la Universidad de Almería.

Se calcularon los espectros de Fourier de las señales medidas en la parte superior de cada edificio con los equipos de Barcelona y Almería y las funciones de transferencia para identificar las frecuencias fundamentales de vibración en las direcciones longitudinal y transversal (Tabla 3.3). También se calcularon las funciones de coherencia en el entorno de las frecuencias propias identificadas. Se observó que sólo en muy pocos casos la coherencia tiene un valor aceptable (mayor que 0.8).

De 88 frecuencias identificadas con las funciones H1 y H2 en las dos direcciones, sólo 5 tienen valores de coherencia mayores que 0.9, y en el 83% de los casos analizados se obtienen valores de coherencia inferiores a 0.8. En general, la coherencia es muy baja, indicando que las frecuencias identificadas a partir de las funciones de transferencia son poco fiables. En las Figuras 3.14 y 3.15 se presentan dos ejemplos en los que las coherencias son respectivamente buenas y malas.

La Figura 3.14 presenta las gráficas de los datos medidos en el edificio A30, en el que se obtuvieron los valores de coherencia más altos (función H1) coincidiendo las frecuencias identificadas en las dos direcciones con las que se identifican en los registros obtenidos con los equipos de Barcelona y Almería. También hay buen acuerdo entre las frecuencias identificadas en el espectro de Fourier obtenido usando el equipo de un canal y la función de transferencia H1.

La Figura 3.15, es análoga a la Figura 3.14 y corresponde al edificio A20. En ella se observan valores de coherencia bajos, pero las frecuencias fundamentales se

identifican con claridad en los espectros de Fourier de las aceleraciones medidas en la parte superior del edificio, tanto en los correspondientes a los registros obtenidos con el equipo de Barcelona como en los que se obtuvieron con el equipo de la Universidad de Almería.

ID	EB <sub>L</sub>	EA <sub>L</sub>	H1 <sub>L</sub>	H2 <sub>L</sub>	EB <sub>T</sub>	EA <sub>T</sub>	H1 <sub>T</sub>	H2 <sub>T</sub>
A1	3.12	3.32	5.37 (0.49)	5.42 (0.45)	3.68	3.71	4.49 (0.67)	3.96 (0.58)
A2	5.84	5.66	6.01 (0.52)	6.79 (0.38)	4.16	4.25	4.30 (0.86)	4.44 (0.70)
A3	5.04	4.00	4.49 (0.83)	4.35 (0.76)	4.48	3.91	4.49 (0.76)	4.88 (0.70)
A4	3.60	3.52	3.17 (0.81)	3.27 (0.75)	3.12	3.08	1.76 (0.77)	2.10 (0.54)
A5	3.68	3.56	1.56 (0.65)	1.56 (0.65)	3.92	3.81	1.56 (0.61)	2.49 (0.62)
A6	4.72	4.74	2.54 (0.61)	1.95 (0.40)	4.40	4.30	1.90 (0.64)	1.90 (0.64)
A7	3.12	3.13	2.69 (0.83)	1.56 (0.55)	5.36	5.57	5.57 (0.66)	5.66 (0.59)
A10	4.80	4.98	1.51 (0.65)	3.91 (0.75)	5.12	4.10	7.37 (0.37)	7.32 (0.31)
A11	6.00	6.20	7.52 (0.63)	7.62 (0.64)	5.36	5.42	7.67 (0.58)	6.49 (0.41)
A13	4.40	4.30	4.25 (0.68)	4.15 (0.59)	4.48	4.44	4.88 (0.85)	2.69 (0.46)
A15	8.56	8.11	9.67 (0.54)	9.57 (0.51)	6.00	5.91	6.01 (0.68)	6.10 (0.70)
A16	-----	3.71	4.49 (0.85)	4.74 (0.45)	3.76	3.66	5.42 (0.65)	5.08 (0.36)
A17	6.40	6.49	4.30 (0.52)	4.88 (0.40)	6.32	6.54	6.79 (0.80)	2.98 (0.38)
A20	7.52	7.47	7.47 (0.64)	7.47 (0.64)	6.16	6.15	6.35 (0.70)	6.35 (0.70)
A21	5.12	5.08	6.30 (0.85)	1.95 (0.41)	5.04	5.03	1.17 (0.46)	1.17 (0.46)
A22	4.48	4.35	3.71 (0.48)	4.35 (0.54)	5.28	4.59	5.23 (0.61)	4.93 (0.34)
A23	3.28	3.27	2.30 (0.79)	4.59 (0.21)	3.84	3.86	4.49 (0.87)	5.08 (0.55)
A24	5.12	5.03	5.13 (0.93)	5.13 (0.93)	5.60	5.52	4.93 (0.60)	4.93 (0.60)
A26	4.72	4.64	4.74 (0.84)	5.13 (0.58)	6.24	6.35	6.40 (0.91)	4.20 (0.47)
A27	2.40	2.44	3.22 (0.60)	2.00 (0.39)	2.56	2.44	2.49 (0.52)	2.49 (0.52)
A28	3.84	3.76	3.86 (0.56)	3.81 (0.53)	4.88	4.88	4.93 (0.67)	4.93 (0.67)
A30	2.40	2.39	2.34 (0.97)	1.90 (0.59)	2.48	2.49	2.49 (0.98)	1.95 (0.62)

**Tabla 3.3** Comparación de las frecuencias fundamentales, en Hz, de un grupo de 22 edificios de Adra obtenidos a partir del espectro de Fourier de la señal registrada por un sensor colocado en la parte superior de los edificios, con equipos de Barcelona (EB) y Almería (EA) y a partir de las funciones de transferencia H1 y H2. Los subíndices L y T indican las direcciones longitudinal y transversal y entre paréntesis se muestran los valores de coherencia correspondientes.

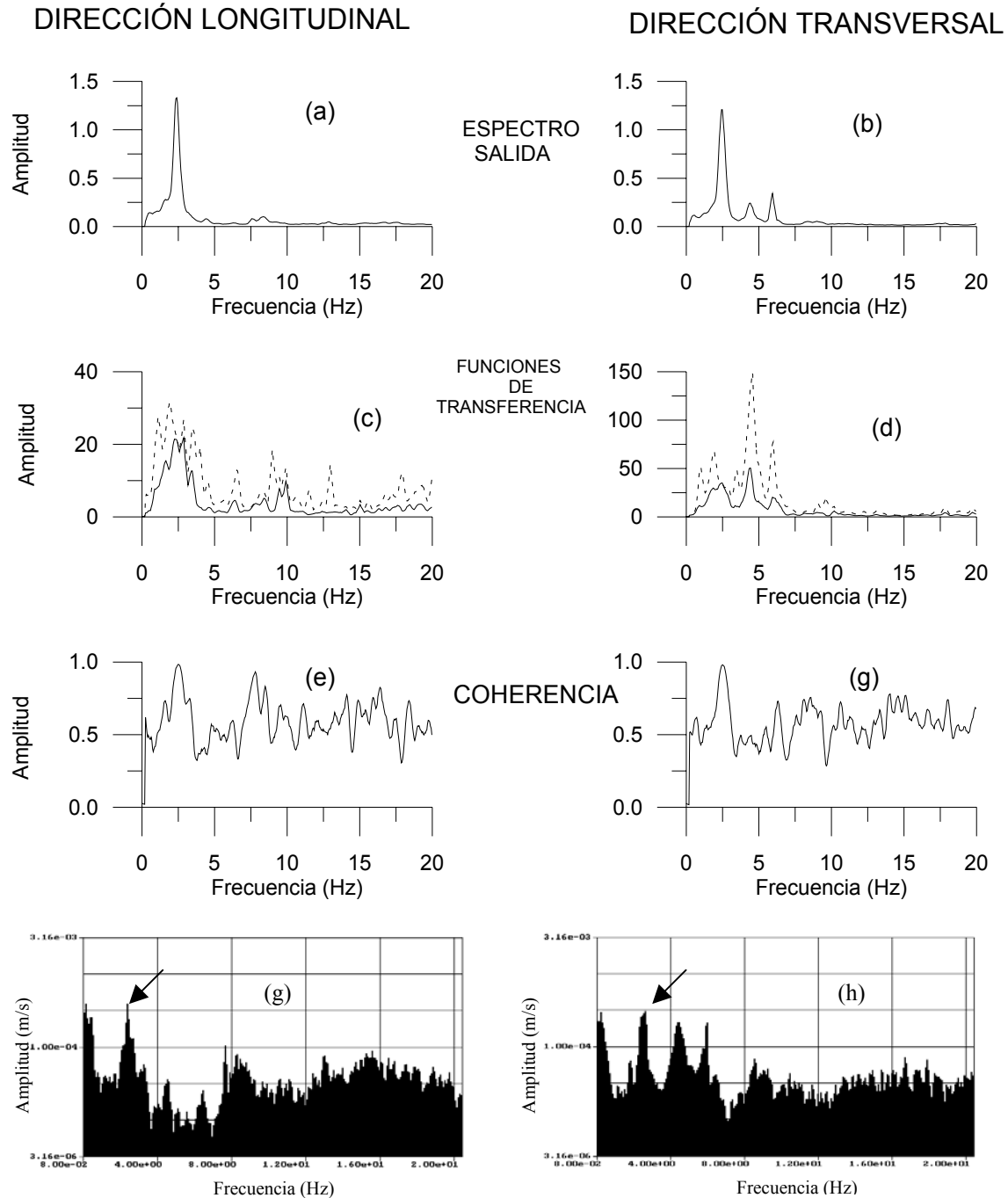
En el Anexo 3.2 se presentan las gráficas correspondientes a los datos obtenidos en el resto de los edificios estudiados en Adra. En ellas se observan los espectros de la señal del canal colocado en la parte superior de cada edificio, las funciones de transferencia H1 y H2 y las funciones de coherencia.

Los valores de frecuencia y coherencia se resumen en la Tabla 3.3. Esta tabla muestra también los porcentajes de las diferencias entre las frecuencias obtenidas con los equipos de Barcelona y Almería. De los 44 datos (22 edificios, 2 direcciones), sólo en un caso, probablemente debido a un mal funcionamiento de los equipos, no fue



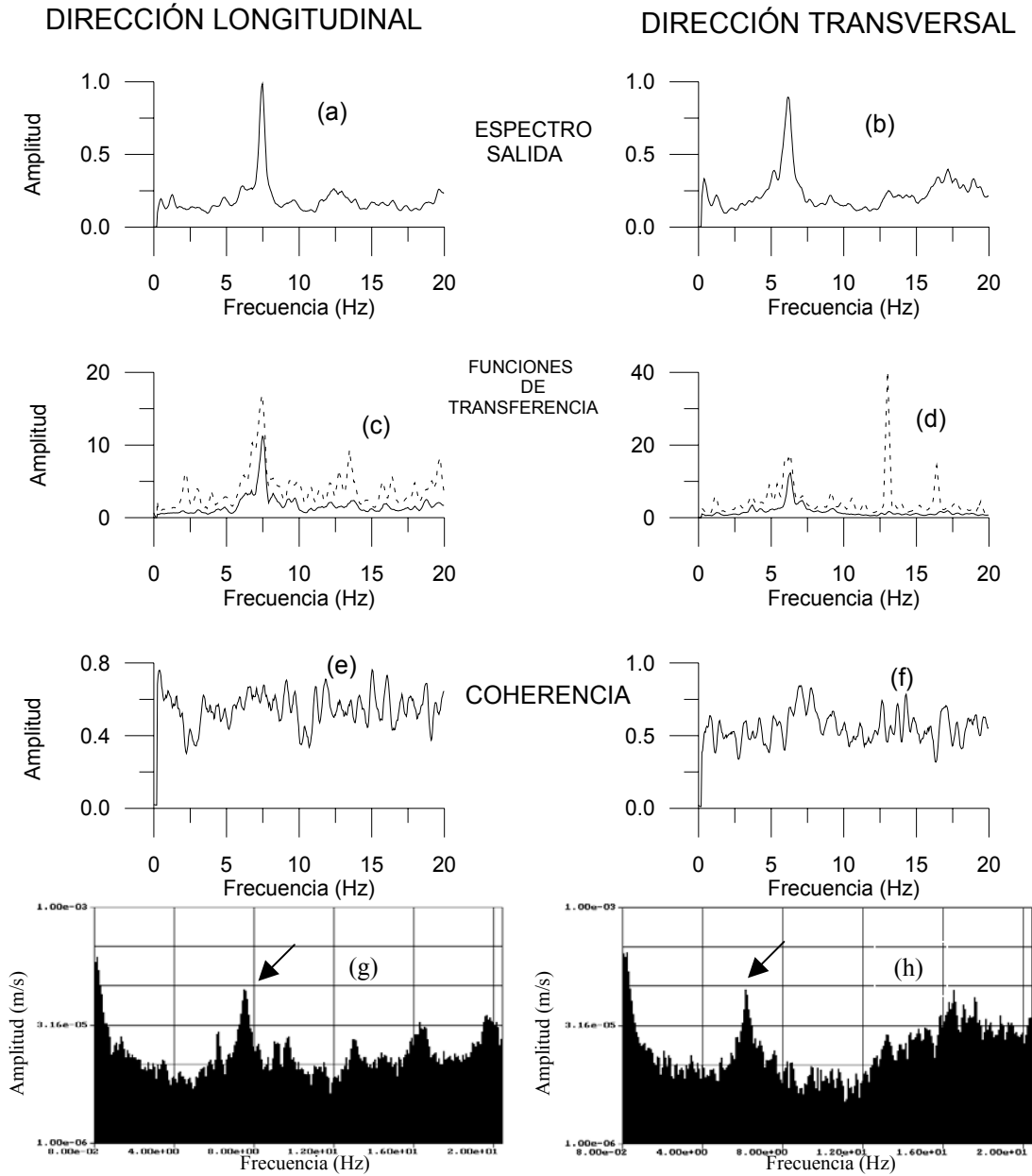
posible identificar la frecuencia predominante correspondiente a una dirección, el valor medio de las diferencias entre las restantes determinaciones efectuadas con los equipos de Barcelona y Almería es del 3.31% con una desviación estándar de 4.68%. La desviación mínima es del 0.00% y la máxima del 20.63%.

### EDIFICIO A30



**Figura 3.14** Espectros de Fourier de la aceleración medida, en la parte superior del edificio A30, con los equipos de Almería (a) y (b) y de Barcelona (g) y (h); funciones de transferencia H1 y H2 (c) y (d) y, funciones de coherencia (e) y (f).

### EDIFICIO A20



**Figura 3.15** Espectros de Fourier de la aceleración medida, en la parte superior del edificio A20, con los equipos de Almería (a) y (b) y de Barcelona (g) y (h); funciones de transferencia H1 y H2 (c) y (d) y, funciones de coherencia (e) y (f).

En el 84% de los periodos estimados usando el espectro de la señal en la parte superior del edificio, la diferencia entre los periodos obtenidos con los equipos de Barcelona y Almería es inferior al 5%.

Las mayores diferencias ocurren en los edificios A3 dirección longitudinal (20.63%) y A10 dirección transversal (19.92%). Estos casos se presentan en la Figura

3.16 donde aparecen los picos correspondientes a las frecuencias listadas en la Tabla 3.4. En cada caso se eligió el pico mejor definido en la zona de menor frecuencia.

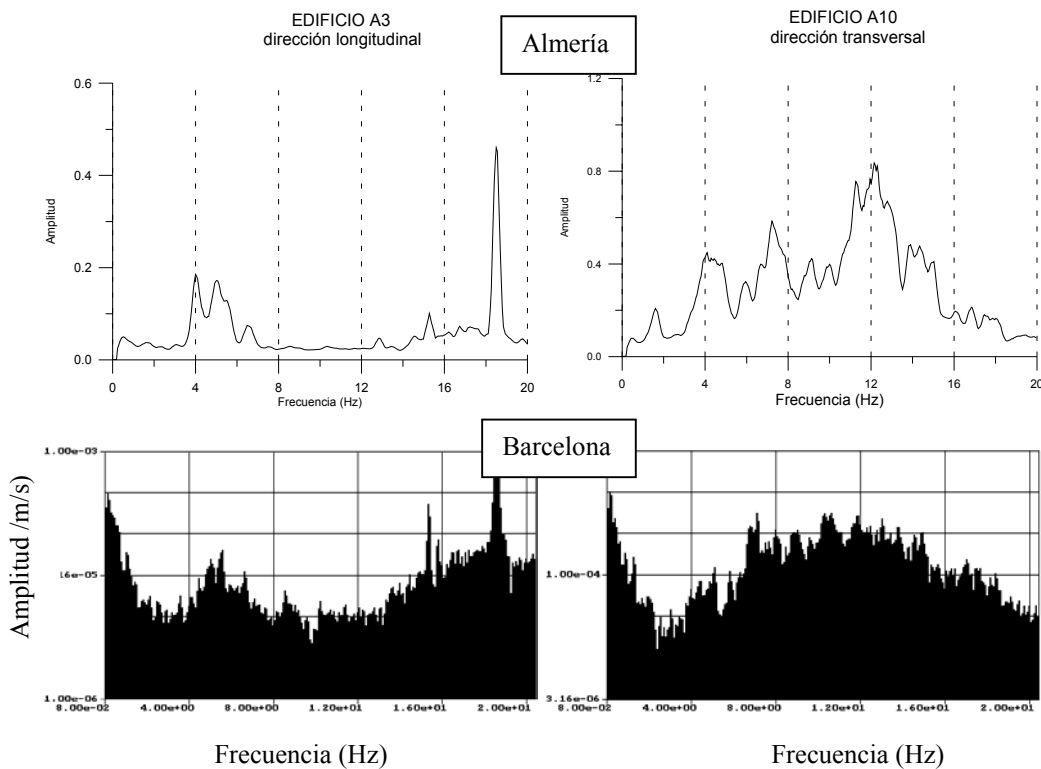
ID	EB <sub>L</sub>	EA <sub>L</sub>	BA <sub>L</sub> %	EB <sub>T</sub>	EA <sub>T</sub>	BA <sub>T</sub> %
A1	3.12	3.32	6.41	3.68	3.71	0.82
A2	5.84	5.66	3.08	4.16	4.25	2.16
A3	5.04	4	20.63	4.48	3.91	12.72
A4	3.6	3.52	2.22	3.12	3.08	1.28
A5	3.68	3.56	3.26	3.92	3.81	2.81
A6	4.72	4.74	0.42	4.4	4.3	2.27
A7	3.12	3.13	0.32	5.36	5.57	3.92
A10	4.8	4.98	3.75	5.12	4.1	19.92
A11	6	6.2	3.33	5.36	5.42	1.12
A13	4.4	4.3	2.27	4.48	4.44	0.89
A15	8.56	8.11	5.26	6	5.91	1.50
A16	-----	3.71	-----	3.76	3.66	2.66
A17	6.4	6.49	1.41	6.32	6.54	3.48
A20	7.52	7.47	0.66	6.16	6.15	0.16
A21	5.12	5.08	0.78	5.04	5.03	0.20
A22	4.48	4.35	2.90	5.28	4.59	13.07
A23	3.28	3.27	0.30	3.84	3.86	0.52
A24	5.12	5.03	1.76	5.6	5.52	1.43
A26	4.72	4.64	1.69	6.24	6.35	1.76
A27	2.4	2.44	1.67	2.56	2.44	4.69
A28	3.84	3.76	2.08	4.88	4.88	0.00
A30	2.4	2.39	0.42	2.48	2.49	0.40

**Tabla 3.4** Porcentajes de diferencias de las frecuencias identificadas a partir de los espectros de Fourier de la aceleración medida en la parte superior de un conjunto de edificios de la ciudad de Adra utilizando los equipos de Barcelona y Almería. ID identifica el número del edificio. EB<sub>L</sub> y EA<sub>L</sub> corresponden a las frecuencias longitudinales halladas con datos de los equipos de Barcelona y Almería, EB<sub>T</sub> y EA<sub>T</sub> corresponden a las frecuencias en la dirección transversal. BA<sub>L</sub> y BA<sub>T</sub> son las diferencias, en %, entre las frecuencias determinadas con los equipos de Barcelona y Almería.

### 3.6 Conclusión

En este capítulo se han analizado los métodos y técnicas más frecuentemente recomendados y utilizados para la determinación empírica de los periodos propios de vibración de edificios. Para analizar la fiabilidad y aplicabilidad de estos métodos se ha usado un criterio basado en el análisis de la coherencia entre las supuestas señales de entrada y salida del sistema que constituye un edificio. La función de coherencia calculada utilizando como señal de entrada la medida en la parte inferior de un edificio y como señal de salida la medida en la parte superior, presenta, en general, valores muy

bajos por lo que las funciones de transferencia calculadas utilizando este método no son fiables. Da mejores resultados el uso de un instrumento situado en la parte superior del edificio. Probablemente esto es así debido a la dificultad de obtener la verdadera señal de entrada que excita el edificio. Ésta debe estar constituida por la entrada en la base del edificio, excitaciones debidas a las perturbaciones atmosféricas que afectan a la totalidad del edificio más excitaciones internas aleatorias e incontroladas. El resultado probable de la superposición de estas pequeñas (energéticamente hablando) acciones es un ruido de amplitud espectral plana en el ancho de banda frecuencial en el que se halla la función de transferencia del edificio. Este hecho explicaría la detección en la parte superior del edificio de las frecuencias propias amplificadas por el edificio. La experimentación en laboratorio, en un modelo estructural a escala al que se han aplicado distintas excitaciones confirman este resultado.



**Figura 3.16** Gráficas de los espectros de Fourier de las aceleraciones medidas en la parte superior de los edificios A3 (dirección longitudinal) y A10 (dirección transversal) de Adra utilizando los equipos de Almería y Barcelona.

Adicionalmente, el método que finalmente se ha adoptado para el análisis de los periodos predominantes de los edificios de la ciudad de Barcelona, resulta ser más sencillo, rápido y económico que el que requiere medidas a diferentes niveles de la estructura. Estos métodos más complejos, sin duda son necesarios y convenientes cuando se tiene una excitación predominante controlada o tipo sismo (en este último caso sí que la entrada predominante entra por la base del edificio). Por lo tanto los resultados de este capítulo no descalifican otros métodos de determinación de respuesta

de edificios, pero sí que identifican que para la estimación de periodos propios de edificios utilizando ruido ambiental, es suficiente, más conveniente y fiable usar sólo el espectro de la señal registrada en la parte superior del edificio.

El bajo nivel de vibración requerido para ser aplicado es proporcionado por el ruido cultural y natural, siendo recomendable operar durante el día cuando la actividad humana aumenta y, por consiguiente, también aumentan los niveles de excitación.

Se concluye, por tanto, que de los resultados de tres estudios realizados: 1. sobre un modelo de estructura metálica a escala, 2. sobre la respuesta de un edificio singular (edificio EH de Barcelona) y 3. sobre 22 edificios de la ciudad de Adra, se deduce que el mejor método para identificar el periodo fundamental de un edificio sometido a la vibración ambiental, consiste en registrar la señal en su parte más alta y basta con el uso de equipos de un sólo canal. Adicionalmente el método es sencillo, rápido y económico.