

## **CAPÍTULO 4**

### **MODELADO DE ESTRUCTURAS**

La dialéctica observación-modelización-observación ha sido el motor del progreso científico y tecnológico durante los últimos siglos. El problema directo consiste en la determinación de los observables esperados, a partir de un modelo lógico matemático, mientras que el inverso permite estimar las características del modelo a partir de las observaciones. Este “*feed back*” entre la observación y la modelización permite hallar modelos finos representativos de la “realidad” que a su vez, permiten predecir su comportamiento futuro. Así pues, también para analizar las características dinámicas de edificios los investigadores utilizan modelos matemáticos. La información obtenida con pruebas de vibración ambiental en los edificios permite evaluar aspectos relacionados con la optimización del comportamiento de las estructuras sometidas a cargas dinámicas (Muriá-Vila y González, 1995). Por otra parte estas pruebas hacen posible la calibración de modelos o edificios virtuales, cuyas respuestas sean similares a las observadas. Para este tipo de estudios realizados sobre edificios existentes es tan necesario disponer de las características de diseño de los edificios (planos estructurales) como de las observaciones de su respuesta dinámica.

Durán et al (1987) comparan los periodos fundamentales de 21 edificaciones obtenidos con vibración ambiental, con los resultados de modelos teóricos cuando les fue posible obtener los datos del proyectista o al menos los planos de los edificios para realizar dichos cálculos.

Torkamani y Ahmadi (1988) mencionan que la diferencia entre los resultados de los modelos analíticos y los obtenidos de pruebas de vibración ambiental es debida a un modelado inadecuado de los elementos estructurales, despreciando los elementos no estructurales y las rotaciones de los nudos.

En este capítulo, teniendo en mente las consideraciones anteriores, se analiza el modelado de estructuras de mampostería y de hormigón armado; se describen los modelos y su implementación en ordenadores mediante programas de elementos finitos, y, con el único fin de calibrar modelos comparando la respuesta calculada con la medida, se efectúa el modelado de un edificio de mampostería y uno de hormigón armado. Para el uso del programa de modelado SAP 90, el autor fue asesorado por ingenieros civiles. El Ingeniero Ulises Mena efectuó el modelado del edificio singular ya que por su nivel de complejidad hacía preferible que lo efectuase un experto en dinámica estructural. En el capítulo 5 se complementa el estudio de modelado estructural, con el análisis de la influencia de los elementos no estructurales. Para ello se realiza el seguimiento de un edificio durante las etapas constructivas, observándose cambios significativos en su periodo fundamental. El modelado de este último edificio se efectuó por el arquitecto Francisco Muñoz y el Ingeniero Servio Tulio Delacruz.

## 4.1 MODELADO DE UN EDIFICIO DE MAMPOSTERÍA

### 4.1.1 Descripción del edificio y del modelo.

El primer edificio analizado, es de mampostería y es típico de la parte alta de Barcelona (Bonanova, Sarrià o San Gervasio). Estos edificios fueron construidos en la década de los 30 por familias de la burguesía alta o media relativamente acomodadas, para su uso como casa de campo o segunda residencia, en las afueras de la ciudad. El crecimiento urbanístico de la segunda mitad del siglo absorbió este tipo de vivienda incorporándolas a un paisaje ciudadano cada vez más moderno, compacto y heterogéneo. La vivienda consta de 2 niveles y un pequeño sótano frecuentemente utilizado como bodega. Llamaremos a este edificio, *edificio EM*. En la Figura 4.1 se presentan las secciones en elevación y en planta y la Figura 4.2 es una fotografía del edificio.

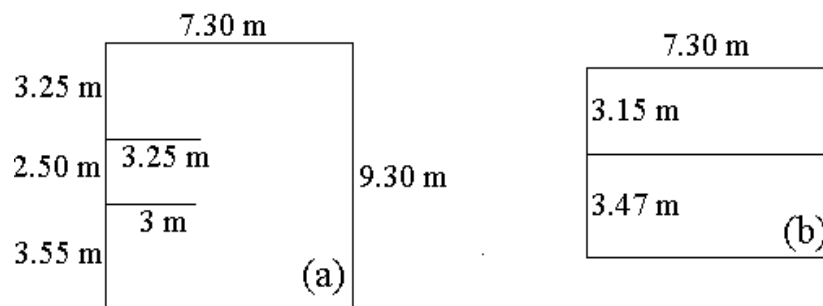
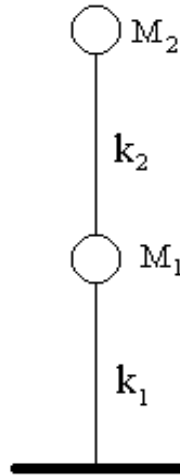


Figura 4.1 Sección en elevación (a) y sección en planta (b) del edificio EM.



Figura 4.2 Fotografía del edificio EM.

El edificio se modeló mediante un sistema simplificado de dos grados de libertad y se efectuó el análisis mediante el programa SAP 90 suponiendo un comportamiento análogo para las direcciones transversal y longitudinal.



**Figura 4.3** Modelo simplificado del edificio EM.

Las masa  $M_1$  consta de la mitad de la masa de los muros de la planta baja (la otra mitad se asocia al suelo), la masa de la losa del entrepiso y la mitad de la correspondiente a los muros de la planta alta. El resto de las masas se incluye en  $M_2$ . Para el cálculo de las rigideces se utilizan los momentos de inercia ( $I_x$ ,  $I_y$ ) y los módulos de elasticidad, que se suponen iguales para cada barra. La Tabla 4.1 presenta los valores de densidad, masa y módulo de elasticidad utilizados (Yépez, 1996: Pere Roca, comunicación personal).

$M_1$	8849 kg
$M_2$	7995 kg
$I_x$	193.93 m <sup>4</sup>
$I_y$	105.167 m <sup>4</sup>
densidad	1800 kg/ m <sup>3</sup>
elasticidad	15 000 ton/ m <sup>2</sup>

**Tabla 4.1** Algunas características del modelo del edificio EM.

#### **4.1.2 Resultados**

Los periodos obtenidos mediante el modelado y el análisis de ruido se muestran en la Tabla 4.2. Las diferencias entre los valores observados y el periodo fundamental calculado son del 2% para la dirección longitudinal y del 8% para la transversal. Estas diferencias son más que razonables si se tienen en cuenta las simplificaciones efectuadas en el modelado del edificio.

<b>Simulado</b>	0.109 s	
<b>Observado</b>	Dirección longitudinal	0.111 s
	Dirección transversal	0.118 s

**Tabla 4.2** Periodos del edificio EM obtenidos a partir de la medida de la aceleración en su parte superior y del modelado numérico.

## 4.2 MODELADO DE UN EDIFICIO SINGULAR

### 4.2.1 Descripción del edificio y del modelo

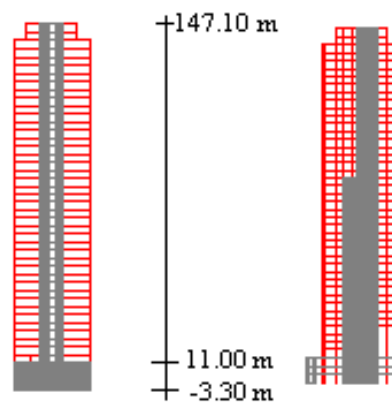
El segundo edificio analizado es un edificio singular (Figura 4.4). Se trata de un edificio moderno construido al principio de la presente década y que se halla en la parte sur de la ciudad, a unos 100 m de la línea de mar. Este edificio consta de 42 niveles y 3 sótanos y se compone de un núcleo central de hormigón armado al que se acoplan estructuras aperticadas de acero de alta resistencia. La altura total de la Torre, incluyendo las 3 plantas del sótano, es de 150.40 m (Figura 4.5) y sus dimensiones en planta son de 31.40 por 32.40 m para todos los niveles excepto para los sótanos que son de forma trapezoidal (Figura 4.6). La altura de cada sótano es de 3.60 m y la de cada nivel es de 3.30 m (Figuras 4.7 y 4.8). El núcleo de hormigón armado tiene una resistencia de 250 kg/cm<sup>2</sup> hasta la planta 14 y de 200 kg/cm<sup>2</sup> para el resto de los niveles con un espesor principal de 70 cm y acero de refuerzo de 5100 kg/cm<sup>2</sup>. Entre los núcleos existe una losa maciza de 15 cm de espesor con una resistencia a la fluencia de 250 kg/cm<sup>2</sup>. En cuanto a los pórticos de acero, los pilares presentan una variación a lo largo de la altura de la Torre, con dos tipos de secciones principales, una simple y una compuesta (Figura 4.9) y los perfiles utilizados se muestran en la Tabla 4.3. Estos pilares son perfiles HD de acero HISTAR 460 caracterizados por un límite elástico de 4600 kg/cm<sup>2</sup>.

En cuanto a las vigas se utilizaron perfiles del tipo IPE, con el mismo límite elástico. El forjado que se utilizó es de chapa plegada “ROBERTSON” QL-59 con 6.5 cm de capa de compresión (espesor total 12.5) con una carga adicional de 500 kg/m<sup>2</sup> para cada planta excepto para las plantas 4, 23, y 41 donde la carga adicional es de 1000 kg/m<sup>2</sup>. El forjado utilizado en los sótanos es una retícula de 80 x 80 cm con un espesor

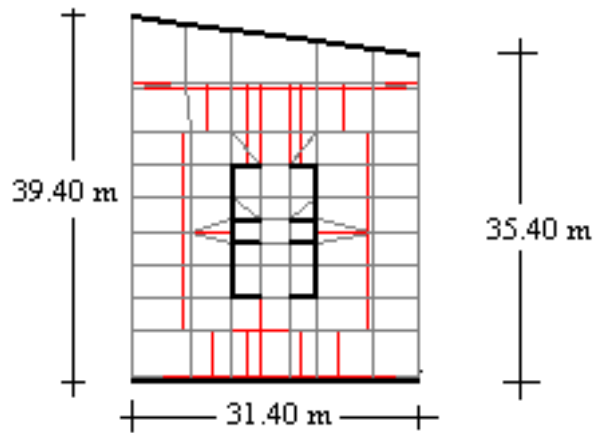
máximo de 35 cm. Los pilares de los tres sótanos son de hormigón armado con diferentes dimensiones en las secciones. El modelo estructural se realizó con el programa de elementos finitos SAP 90 de la siguiente forma: para los pilares y vigas se utilizaron elementos FRAME y para los muros y forjados se utilizaron elementos SHELL. Se colocó un nudo maestro en cada nivel restringiendo el movimiento de los nudos de ese nivel al nudo maestro debido a que el número de nudos utilizados fue muy grande.



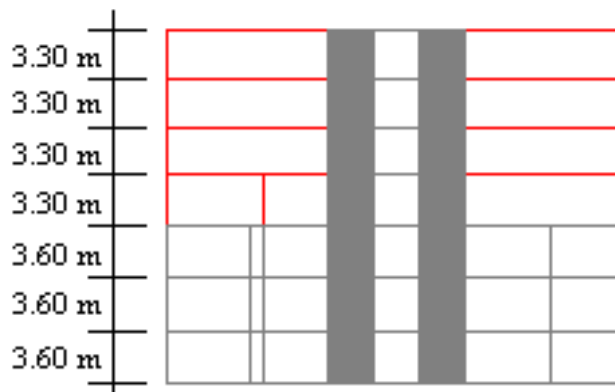
**Figura 4.4** Fotografía del edificio EH.



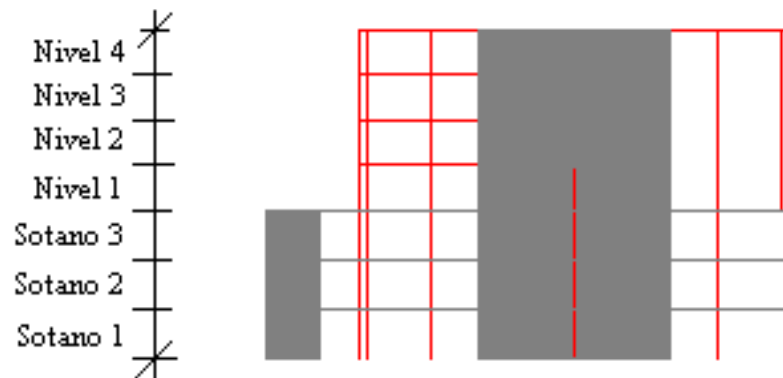
**Figura 4.5** Vista norte-sur y este-oeste. En el primer alzado se pueden observar los dos muros que forman el corazón de la Torre. En el segundo se observa una vista lateral donde a partir del piso 23 se reduce la dimensión del muro.



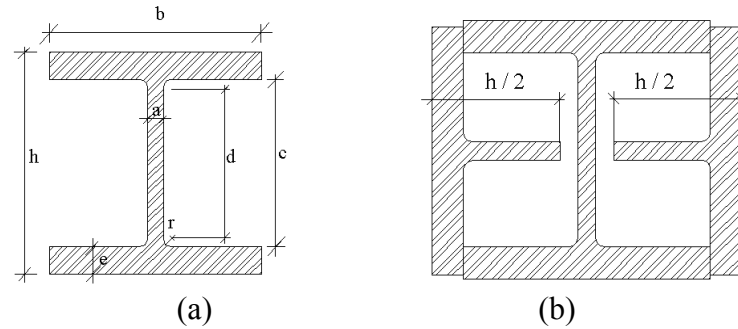
**Figura 4.6** Planta del edificio. Las líneas oscuras muestran la ubicación de los muros de hormigón armado.



**Figura 4.7** Vista norte-sur. Ampliación de los sótanos y las cuatro primeras plantas. Las líneas verticales grises representan los pilares de hormigón armado.



**Figura 4.8** Vista este-oeste. Es una ampliación similar a la de la **figura 4.7**, sólo que en el lateral opuesto. Aquí se puede observar que una de las dimensiones de los sótanos es mayor que el resto de los niveles.



**Figura 4.9** Secciones simple (a) y compuesta (b) de los perfiles de acero utilizados en el edificio EH.

<b>DIMENSIONES DE PILARES DE ACERO</b>							
<b>PILARES</b>	<b>DIMENSIONES (mm)</b>						
	<b>h</b>	<b>b</b>	<b>a</b>	<b>e</b>	<b>r</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
HD 400x400x463	435	412	35.5	57.5	15	320	290
HD 400x400x422	425	409	33	52.5	15	320	290
HD 400x400x383	416	406	30	48	15	320	290
HD 400x400x347	407	404	27.5	43.5	15	320	290
HD 400x400x314	400	400	24.5	40	15	320	290
HD 400x400x288	393	399	23	36.5	15	320	290
HD 400x400x262	387	397	20.5	33.5	15	320	290
HD 400x400x237	381	395	18.5	30.5	15	320	290
HD 400x400x216	375	394	17.5	27.5	15	320	290
HD 400x400x187	368	391	15	24	15	320	290
HD 360x360x179	368	372	15	24	15	320	290
HD 360x360x162	364	371	13	22	15	320	290
HD 360x360x148	360	370	12	20	15	320	290
HD 360x360x134	356	368	11.5	18	15	320	290
HD 210x210x161	255	219	23	37	10	181	161
HD 210x210x138	245	216	20	32	10	181	161
HD 210x210x118	237	213	17	28	10	181	161
HD 210x210x100	229	210	14.5	24	10	181	161
HD 210x210x87	222	209	13.5	20.5	10	181	161
HD 210x210x71	216	206	10	17.5	10	181	161
HD 210x210x52	206	204	8	12.5	10	181	161
HD 210x210x46	203	203	7	11	10	181	161

**Tabla 4.3** Dimensiones de los perfiles HD de acero HSTAR 460 de 4600 kg/cm<sup>2</sup> de límite elástico.

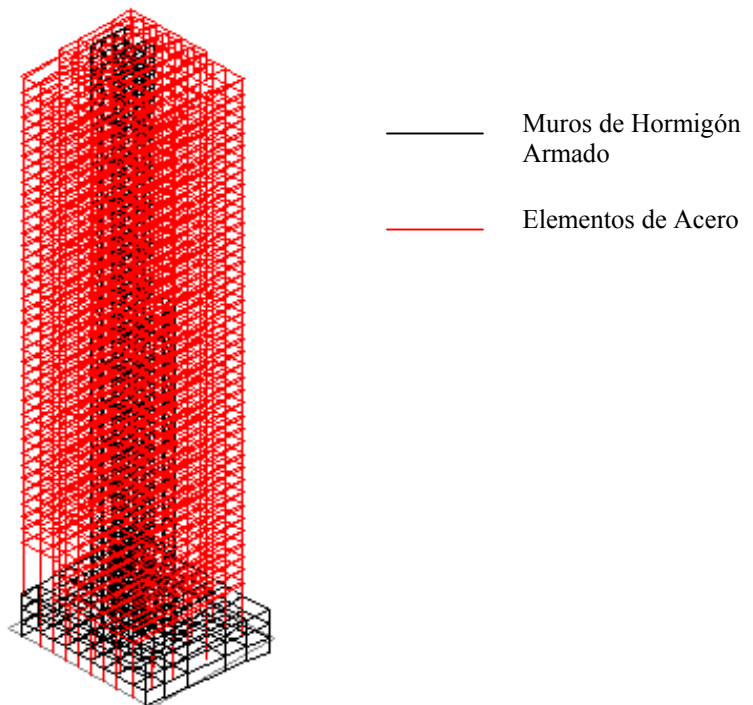
En la Figura 4.10, se muestra una vista tridimensional del edificio. El color rojo (gris) representa los elementos de acero estructural y el color negro representa los muros y forjados del hormigón armado.

#### 4.2.2 Resultados del Edificio EH

Como el objetivo principal del modelo es estimar el periodo fundamental esperado para el edificio para compararlo con el medido, se realizó un análisis dinámico evaluando los primeros modos. Estos periodos teóricos junto con los observados se presentan en la Tabla 4.4. Se observa un excelente acuerdo en el periodo fundamental, aunque no en los correspondientes a los modos superiores.

modo	modelado	equipo unicanal		equipo multicanal	
		longitudinal	transversal	longitudinal	transversal
1	1.18 (0.85)		1.14 (0.88)		1.16 (0.86)
2	0.78 (1.29)	0.96 (1.04)		0.93 (1.08)	
3	0.42 (2.40)	0.52 (1.92)	0.52 (1.92)		0.55 (1.81)
4	0.36 (2.80)	0.39 (2.56)	0.38 (2.64)	0.36 (2.80)	0.36 (2.81)

**Tabla 4.4** Resultados del análisis dinámico del edificio EH. Se presentan los periodos fundamentales en segundos y entre paréntesis las frecuencias en Hz, de los 4 primeros modos de vibración obtenidos con el modelado numérico y a partir de las aceleraciones medidas en la parte superior del edificio con un equipo unicanal y otro multicanal.



**Figura 4.10** Vista tridimensional del edificio EH.



### **4.3 CONCLUSIÓN**

A partir del modelado de dos edificios característicos, se han determinado los periodos fundamentales esperados. Las medidas de los periodos fundamentales a partir del análisis de ruido registrado en la parte superior de ambos edificios han puesto de manifiesto que existe un buen acuerdo entre los periodos fundamentales simulado y observado, tanto en el caso de un edificio de mampostería sencillo (EM) como en el de un edificio singular y complejo (edificio EH) compuesto de un núcleo de hormigón armado con una estructura metálica a él acoplada. Este resultado apoya la fiabilidad de los periodos fundamentales observados mediante el método utilizado en este trabajo.

Las características especiales y extraordinarias dimensiones del edificio EH, permitieron observar otros periodos en las señales registradas. Estos periodos no muestran un acuerdo con los modos superiores modelados. Este resultado abre una línea de investigación, que permita establecer los niveles de ruido necesarios para detectar modos superiores de vibración, el dispositivo experimental óptimo para su detección.