



**Escuela Técnica Superior de Ingenieros
de Caminos Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Cataluña**

U P C

MEMORIA DE LA TESIS DOCTORAL

**DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS
DE ESTRUCTURAS**

Autor

Fortunato Espinoza Barreras

Directores

Dr. L. G. Pujades Beneit

Dr. J. A. Canas Torres

Barcelona, Octubre de 1999

MEMORIA DE LA TESIS DOCTORAL

**DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS
DE ESTRUCTURAS**

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la CICYT, proyecto N. AMB98-0558, por la DGES proyecto N. PB96-0139-C04-03 y por la Comisión Europea, Directorado General XII para la Ciencia, la Investigación y el Desarrollo, Contrato N. ENV4-CT96-0279.

MEMORIA DE LA TESIS DOCTORAL

**DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS
DE ESTRUCTURAS**

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo recibido por parte de la Universidad Autónoma de Baja California,

a una beca MUTIS de la Agencia Española de Cooperación Internacional que financió parte de los estudios del autor y

a la Secretaría de Educación Pública-Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, instituciones mexicanas que financiaron la otra parte de los estudios mediante una beca PROMEP.

RESUMEN

El objetivo global de este estudio es el análisis de la viabilidad del uso de ruido cultural para la determinación de las características dinámicas de las estructuras existentes, particularmente en zonas urbanas situadas en áreas de actividad sísmica moderada o baja pero que, sin embargo no están exentas de riesgo por causa sísmica, debido a la altísima concentración de población y servicios que en ellas se acumula. Por lo tanto, también constituye un objetivo del presente trabajo el analizar los métodos aplicables, evaluando su adecuación a cada caso concreto para diseñar procedimientos específicos para áreas urbanas densamente pobladas.

La consecución de este objetivo global se realiza mediante los siguientes objetivos concretos:

- Conocimiento y elección de la instrumentación a utilizar.
- Establecimiento de procedimientos específicos adecuados a las peculiaridades de los edificios a estudiar.
- Calibración de métodos y técnicas usadas en la literatura mediante su aplicación en un experimento controlado sobre mesa vibrante.
- Calibración de procedimientos de estimación de periodos propios en edificios reales mediante su medida y su modelado numérico. Propuesta de un procedimiento específico para áreas urbanas.
- Evaluación de la contribución de los elementos no estructurales mediante el seguimiento del proceso constructivo de un edificio.
- Evaluación de la fiabilidad y aplicabilidad de las fórmulas empíricas establecidas en las normas sísmicas y establecimiento de fórmulas específicas para la ciudad de Barcelona.
- Detección y caracterización de zonas de resonancia entre los edificios, los “*inputs*” sísmicos y los periodos predominantes del suelo sobre el cual están construidos.
- Aproximación a la problemática de la interacción suelo-estructura.

Los datos necesarios para el estudio se obtuvieron con trabajo de campo, obteniéndose los registros de ruido ambiental y midiendo la altura y el número de niveles de los edificios. La información complementaria (p.e. dimensiones en planta) se obtuvieron a partir de los datos del catastro facilitadas por el Ayuntamiento de Barcelona. Los periodos fundamentales se identificaron a partir de los espectros de Fourier de las aceleraciones medidas en los niveles superiores de los edificios. Se han realizado medidas en 64 edificios de los cuales se han seleccionados dos muestras representativas de las principales tipologías constructivas de la ciudad de Barcelona; 25 de hormigón armado y 22 de mampostería. La selección de estas muestras se efectuó de acuerdo con los parámetros correspondientes a las fórmulas empíricas a ajustar. Se

buscó homogeneidad en la tipología y variabilidad en el parámetro a ajustar. De esta forma ha sido posible hallar la relación del periodo fundamental con parámetros como el número de niveles, la altura y la dimensión en planta. Se ha encontrado que las fórmulas que mejor se ajustan a edificios de hormigón armado son las que relacionan el periodo fundamental con el número de niveles y para los edificios de mampostería las que relacionan el periodo con la altura. Para comparar diferencias en las tipologías y costumbres constructivas se efectuó una campaña específica en la ciudad de Adra.

También se realizó el seguimiento de un edificio en construcción midiéndose su periodo predominante durante las fases de construcción, analizando las variaciones del periodo predominante con la incorporación al edificio de elementos no estructurales (tabiquería, elementos ornamentales, muros, fachadas, etc.) encontrándose que éstos influyen en el valor del periodo al rigidizar la estructura.

Estudios previos ponen de manifiesto que la interacción suelo estructura puede aumentar el periodo de vibración de la estructura. Una parametrización del efecto propuesta en la literatura se ha usado para estimar este efecto en Barcelona y se encontró que esta interacción es importante en edificios situados en zonas en las que se disponía de resultados de la respuesta y de las características dinámicas del suelo (V_s) concluyéndose que incluso en el caso en que los periodos del suelo y de la estructura difieran, no se debe desechar el fenómeno de resonancia sin antes evaluar el efecto de interacción.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a las siguientes personas e instituciones:

- A los profesores José Antonio Canas y Luis Gonzaga Pujades por haber apoyado la realización de esta tesis.
- A Oriol Caselles por haber sido, en la práctica, un director de tesis y un amigo.
- A Jaume Clapés por su colaboración en el manejo del equipo.
- A Fabricio Yépez por sus valiosas indicaciones para iniciar este trabajo.
- A Pere Farrés por su apoyo para conseguir el acceso a edificios susceptibles de medir.
- A los propietarios de edificios por su amabilidad y buena disposición.
- A todas las personas que me facilitaron el acceso a los edificios.
- A la Sra. Regidora Carmen San Miguel, presidenta de la Comisión de Movilidad y Seguridad del municipio de Barcelona, por las facilidades dadas y al señor Carlos Amieiro, Director de Protección Civil, por el apoyo logístico proporcionado.
- A mis compañeros de cursos, especialmente a Esperanza Maldonado, Ulises Mena, Francisco Gutiérrez, Carmen Ferrada y José Miguel Cancino quienes me dieron apoyo moral y ayuda técnica.
- A Ulises Mena, mi principal asesor en ingeniería civil y en software. Además quiero agradecerle por toda su contribución en esta tesis. Él realizó el modelado analítico del edificio (EH) de hormigón armado de 42 niveles, proporcionó datos y realizó cálculos y figuras utilizando un sistema de información geográfica.
- A Salvador Safina quien siempre me dio valiosos consejos y ayuda, principalmente en el tema de interacción suelo-estructura.
- A Francisco Muñoz y Servio Tulio De la Cruz por su asesoría en muchos temas y por la realización del modelado analítico de un edificio (FU) de hormigón armado.

- Al Director de Protección Civil de Adra, José Espinosa, por las facilidades proporcionadas.
- A Javier Sánchez y Mimoun Chourak por su ayuda durante el trabajo de campo en Adra.
- A Manolo Navarro por su ayuda proporcionada, principalmente para la realización del estudio en Adra.
- A Roberto Aguiar por sus valiosos consejos.
- A Benjamín Terán por su ayuda en el trabajo de campo y un primer modelado analítico del edificio EH.
- A todas las personas que me ayudaron en el trabajo de campo, entre ellas Oriol Caselles, Vega Pérez y Arantxa Ugalde.
- A mis compañeros de piso que siempre me hicieron sentir su apoyo moral.
- A mis amigos con los que compartí los momentos libres. En su compañía esos momentos fueron más gratos. Entre ellos destacan Ulises, Pancho, Tulio, Saúl y Jorge.
- A un grupo de amigos muy especial formado por Lorenzo, Karín, Iván y Amado.
- A Esperanza Maldonado, Gustavo Chio, Nancy, Nayibe y Meywa que han sido como mi familia.
- A todos los amigos de la Universidad Autónoma de Baja California que me han dado alientos para continuar en este camino.
- A los directivos de la Universidad Autónoma de Baja California que me apoyaron en la realización del doctorado.

DEDICATORIA

a mis queridas hijas

Niza

y

Ezra

a toda mi familia

*que lejana en distancia siempre ha estado cerca de mi en
pensamiento*

a

Josefina

por su apoyo

al

Ing. Marco Antonio Uribe Rojo

fue casi un padre para mi

ÍNDICE

	página
RESUMEN	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
DEDICATORIA	viii
ÍNDICE	xii
SÍMBOLOS UTILIZADOS	xv
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABLAS	xxv
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contenido de la memoria	1
1.2 El ruido	3
1.3 Antecedentes	4
1.4 Estudios recientes	6
1.5 Periodo medido con vibración ambiental y sismos	8
1.6 Fórmulas empíricas para el cálculo del periodo fundamental	9
1.7 Utilización en reestructuraciones y durante la construcción	12
1.8 Modelado analítico y su aplicación	15
1.9 Aplicación al análisis de daño	16
1.10 Interacción suelo-estructura	17
1.10.1 Principales efectos de la ISE	20
1.10.2 Identificación de la ISE	21
1.10.3 Diversos estudios de ISE	22
1.11 Respuesta de sitio y resonancia	23
1.12 Diseño sismorresistente	26
1.13 Objetivos del estudio	29
2 INSTRUMENTACIÓN	31
2.1 Equipo utilizado	32
2.2 Equipo de un canal	32
2.2.1 Descripción general	32
2.2.2 Modos de operación	33
2.2.3 Principales características y usos de los equipos utilizados	34
2.2.4 Acelerómetro BRÜEL & KJÆR Tipo 8318	35
2.2.5 Localización de sensores	36
2.3 Equipo multicanal	37
2.3.1 Registrador en cinta de vídeo de 14 canales TEAC XR-50	37
2.3.2 Analizador de dos canales BRÜEL & KÆJR Tipo 2034	39
2.3.3 Acelerómetro BRÜEL & KJÆR Tipo 4370	40
2.3.4 Amplificador de carga BRÜEL & KJÆR Tipo 2635	40
2.4 Equipo de tres canales	40
2.5 Conclusión	41

3 METODOLOGÍA	43
3.1 Método propuesto	43
3.2 Procesado	44
3.3 Modelo de laboratorio	46
3.3.1 Descripción del modelo	46
3.3.2 Análisis mediante modelado numérico	49
3.3.3 Análisis con impulsos y vibración ambiental	49
3.4 Edificio EH	52
3.5 Estudio en la ciudad de Adra (Almería)	57
3.6 Conclusión	61
4 MODELADO DE ESTRUCTURAS	64
4.1 Modelado de un edificio de mampostería	65
4.1.1 Descripción del edificio y del modelo	65
4.1.2 Resultados	66
4.2 Modelado de un edificio singular	67
4.2.1 Descripción del edificio y del modelo	67
4.2.2 Resultados del edificio EH	71
4.3 Conclusión	72
5 FÓRMULAS EMPÍRICAS	73
5.1 Cálculo del periodo	74
5.2 Reevaluación de fórmulas empíricas	76
5.3 Mediciones en Barcelona	76
5.3.1 Obtención de datos	76
5.3.2 Resultados	79
5.3.3 Conclusión	94
5.4 Edificio FU	96
5.4.1 Características del edificio	97
5.4.2 Datos y resultados obtenidos	99
5.4.3 Conclusiones	102
5.5 Análisis de dispersión	103
5.5.1 Método de análisis	103
5.5.2 Resultados	105
5.6 Aplicación en un sistema de información geográfica	107
5.7 Conclusiones	111
6 SUELOS Y ESTRUCTURAS	112
6.1 Periodos de suelos observados en mediciones en edificios	112
6.2 Resultados de las observaciones en los edificios	112
6.3 Conclusiones de las observaciones en los edificios	115
6.4 Estimación del efecto suelo-estructura	116
6.5 Extrapolación del cálculo de ϕ a edificios de Barcelona	118
6.6 Análisis estadístico para inferir la existencia del efecto de ISE	121
6.7 Periodos de edificios y del suelo donde están ubicados	122
6.8 Conclusiones	125

7 CONCLUSIONES	126
7.1 Método	126
7.2 Aplicación del método	127
 REFERENCIAS	 131
 ANEXO 3.1 Pruebas con martillo	 143
ANEXO 3.2 Edificios de Adra	146
ANEXO 5.1 Relación de fórmulas empíricas tomadas de las normativas Mundiales	155
ANEXO 5.2 Edificios de Barcelona medidos	161
ANEXO 5.3 Estimadores de la bondad del ajuste de las curvas	163
ANEXO 5.4 Análisis de residuos	166

SÍMBOLOS UTILIZADOS

<i>símbolo</i>	<i>descripción (unidades)</i>
A	área en planta (m ²)
B	dimensión mínima en planta (m)
Cs	coeficiente de suelo (varía de 0.7 a 0.9 en suelo semiduro y de 0.9 a 1.1 en suelo duro)
<i>d</i>	densidad de los muros estructurales en la dirección considerada (razón del área de esos muros entre el área en planta del edificio)
<i>d</i> *	razón de la suma de las longitudes de los muros resistentes en todos los niveles del edificio entre la suma de las áreas para todos los niveles del edificio (m ⁻¹)
E	edad (años)
Es	esbeltez
g	aceleración de la gravedad
h	altura (m)
H	hormigón armado
ID	identificador del edificio
ISE	Interacción suelo-estructura
k	rigidez
L	longitud en planta del edificio en la dirección de la acción (m)
M	mampostería
MC	muros de corte
MM	modificada de Mercalli
N	número de niveles sobre la rasante
P	periodo fundamental (s)
P _F	periodo fundamental de un edificio de base flexible (s)
P _R	periodo fundamental de un edificio de base rígida (s)
P _L	periodo fundamental longitudinal (s)
P _T	periodo fundamental transversal (s)
PS	periodo del suelo (s)
PSE	periodo del suelo en el edificio (s)
PPSE	probable periodo del suelo en el edificio (s)
R ²	Coficiente de determinación
T	tipología de un edificio
Vs	velocidad de onda s (m/s)
W _i	peso muerto asignado al nivel i
Xp	cantidad X perpendicular a la dirección considerada
δ	desplazamiento lateral elástico
γ	razón de la altura total de niveles de construcción de acero a la altura total del edificio
λ	coeficiente de rigidez (se determina por interpolación lineal entre λ=0.07, edificio muy rígido, y λ=0.10, edificio muy flexible)

- φ parámetro de rigidez relativa del suelo
- ρ razón del área de los muros de cortante de hormigón armado entre el área total de los muros de corte y las columnas de hormigón armado

LISTADO DE FIGURAS

	<i>página</i>
1.1 Ruido de fondo presente en sismogramas y originado por diferentes causas: (a) viento, (b) mecánico, (c) cultural y (d), (e) y (f) microsismos (Payo, 1986).....	4
1.2 Comparación del periodo (en segundos) obtenido con vibración forzada y con vibración ambiental (Midorikawa, 1990).....	6
1.3 Razón de periodos calculados a partir de excitaciones sísmicas y de vibraciones ambientales. Las unidades de la aceleración pico son cm/s^2 (Midorikawa, 1990).....	10
1.4 Relación entre el periodo natural y el número de niveles (Midorikawa, 1990).....	11
1.5 Relación entre el periodo natural y el número de niveles para el modo translacional (Midorikawa, 1990).....	13
1.6 Comparación de las funciones de transferencia obtenidas de las pruebas de vibración ambiental, antes y después del refuerzo de un edificio de 8 niveles. Se relacionan las señales medidas en la dirección transversal en AC -centro de la azotea- con S2 -sótano (Muriá-Vila y González, 1995).....	18
1.7 Modelo discretizado del sistema suelo-estructura completo. El suelo se limita con una frontera colocada tan lejos de la estructura que durante un terremoto, las ondas originadas por la interfase suelo-estructura no la alcancen. Las letras r, i, b y s representan nodos en la frontera exterior del suelo, en la región interior del suelo, en la frontera suelo-estructura y en la estructura, respectivamente (Wolf, 1985).....	18
1.8 Respuesta sísmica de estructura (a) cimentada en roca, (b) empotrada en suelo descansando en roca con campo libre (Wolf, 1994).....	19
1.9 Modelo de interacción suelo-estructura. Las rigideces de la cimentación se representan por resortes translacionales (K_v) y rotacionales (K_β) (Nadjai et al, 1999).....	21
1.10 Coherencia y espectro cruzado normalizado entre el movimiento transversal relativo en la azotea y el movimiento de cabeceo (Bard et al, 1992).....	24
1.11 Condiciones de suelo y aceleraciones máximas de terreno registradas durante el sismo de San Francisco de 1957 (Fang, 1991).....	25
1.12 Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales. (Cid, 1999).....	26
1.13 Funciones de transferencia de las zonas en que se clasificó el suelo de Barcelona. La zona 3 se caracteriza por una desamplificación en las bajas frecuencias (Cid, 1999).....	27
1.14 Espectro normalizado de respuesta elástica para tres tipos de suelos y un coeficiente de amortiguamiento del 5%. El eje vertical es la aceleración normalizada por la aceleración máxima del terreno (AE-88, 1992).....	28

1.15	Distribución de aceleraciones espectrales para movimientos registrados durante el sismo de San Francisco de 1957 (Fang, 1991).	29
2.1	(a) Espectro sísmico (b) instrumentos (Roca, Apuntes docentes, 1996).	31
2.2	Fotografía del Analizador de Vibraciones BRÜEL & KJÆR Tipo 2515 utilizado en medición de la aceleración en la parte superior de un edificio.	33
2.3	Acelerómetro BRÜEL & KJÆR Tipo 8318 (Master Catalogue, 1989).	33
2.4	Modos de vibración de un edificio, (a) primer modo o fundamental, (b) segundo modo y (c) tercer modo.	36
2.5	Localización de sensores en un edificio para medir las componentes longitudinal y transversal de la señal.	37
2.6	Fotografía del registrador en cinta de vídeo de 14 canales TEAC XR-50 (izquierda) y del analizador de dos canales BRÜEL & KJÆR Tipo 2034 (derecha).	39
2.7	Acelerómetro BRÜEL & KJÆR Tipo 4370 (Master Catalogue, 1989).	40
2.8	Amplificador BRÜEL & KJÆR Tipo 2635 (Instruction Manual, 1986).	41
2.9	Amplificador, sensores y cables durante una medición de un edificio.	41
2.10	Fotografía del equipo de tres canales de la Universidad de Almería.	42
3.1	Esquema de un edificio y de las direcciones de medición.	43
3.2	a) Estructura aporricada de acero. En b) y c) se tienen 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.	47
3.3	Fotografía del modelo utilizado en el laboratorio y de la mesa vibradora.	47
3.4	Fotografía de la mesa vibradora.	48
3.5	Detalles de las uniones viga-columna (a) y de las uniones de la estructura a la base (b).	48
3.6	Fotografía de un paquete de barras de plomo fijado a una viga.	48
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.	50
3.8	Identificación de las frecuencias propias de vibración de la estructura metálica utilizando ruido ambiental con aceleración pico de 1 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.	51
3.9	Identificación de las frecuencias propias de vibración de la estructura metálica utilizando ruido ambiental con aceleración pico de 20 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.	52

3.10	Respuesta de 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).	54
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).	55
3.12	Espectro de Fourier de la aceleración en la dirección longitudinal, medida en la planta 40 del edificio EH con un equipo unicanal. Los picos 1 y 2 corresponden a las frecuencias de 0.24 y 1.04 Hz, respectivamente.	56
3.13	Espectro de Fourier de la aceleración en la dirección transversal, medida en la planta 40 del edificio EH con un equipo unicanal. El pico señalado corresponde a 0.88 Hz.	56
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).	59
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).	60
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.	62
4.1	Sección en elevación lateral (a) y sección en planta (b) del edificio EM.	65
4.2	Fotografía del edificio EM.	65
4.3	Modelo simplificado del edificio EM.	66
4.4	Fotografía del edificio EH.	68
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.	68
4.6	Planta del edificio. Las líneas oscuras muestran la ubicación de los muros de hormigón armado.	69
4.7	Vista norte-sur. Ampliación de los sótanos y las cuatro primeras plantas. Las líneas verticales grises representan los pilares de hormigón armado.	69
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.	70
4.9	Secciones simple (a) y compuesta (b) de los perfiles de acero utilizadas en el edificio EH.	70
4.10	Vista tridimensional del edificio EH.	71
5.1	Gráfica de las fórmulas empíricas para edificios de mampostería tomadas de las normas sísmicas.	75

5.2	Fórmulas para estructuras aporticadas de hormigón armado tomadas de los códigos.....	75
5.3	Relación entre el periodo natural y el número de niveles para edificios hormigón armado de Granada, España (Kobayashi et al, 1996).....	77
5.4	Periodo de vibración transversal para edificios de mampostería de Portugal (Oliveira, 1997).....	77
5.5	Reducción de la superficie irregular en planta del edificio 39 a una rectangular. Todas las dimensiones están en metros y el área de ambas secciones es 345.5 m ²	79
5.6	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado y mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (en ambas direcciones) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.....	81
5.7	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado y mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (dirección longitudinal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.....	82
5.8	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado y mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (dirección transversal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.....	83
5.9	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (ambas direcciones) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.....	84
5.10	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (dirección longitudinal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.....	85
5.11	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de hormigón armado. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (dirección transversal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.....	86
5.12	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de vivienda de hormigón armado. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (ambas direcciones) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.....	87

5.13	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de escuelas de hormigón armado. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (ambas componentes) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.	88
5.14	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (ambas direcciones) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.....	89
5.15	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (componente longitudinal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.....	90
5.16	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (dirección transversal) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.....	91
5.17	Ajuste lineal de datos y análisis de residuos de edificios de vivienda de mampostería. a) Recta obtenida con regresión lineal relacionando el periodo fundamental (ambas direcciones) con el número de niveles; b) dispersión de los residuos; c) histograma de los residuos con curva normal ajustada y, d) curva normal de residuos transformada y recta ajustada.	92
5.18	Fotografía del edificio FU ya terminada su construcción.	97
5.19	Fotografía de una sección del edificio FU durante la etapa 1 de su construcción.	98
5.20	Fotografía de una sección del edificio FU durante la etapa 3 de su construcción.	98
5.21	Sección estudiada del edificio FU. a) Vista en planta; b) elevación longitudinal; c) elevación transversal. Todas las dimensiones en metros.....	100
5.22	Viga de acero con la que se refuerza la escalera de la sección en estudio del edificio FU.....	101
5.23	Ejemplos de señales medidas en el edificio FU. Espectros de Fourier de la componente longitudinal de la aceleración durante las etapas 1 y 7.....	101
6.1	Espectro de Fourier de la aceleración medida en el edificio 27. El periodo predominante del suelo es mayor que el fundamental del edificio (frecuencia del suelo menor que la del edificio). En esta figura se grafica la amplitud del espectro en el eje vertical contra la frecuencia en el eje horizontal.....	114
6.2	Espectro de Fourier de la aceleración medida en el edificio 14. El periodo predominante del suelo es similar que el fundamental del edificio. En esta figura se grafica la amplitud del espectro en el eje vertical contra la frecuencia en el eje horizontal.....	114
6.3	Espectro de Fourier de la aceleración medida en el edificio 79. El periodo predominante del suelo es menor que el fundamental del edificio	

	(frecuencia del suelo mayor que la del edificio). En esta figura se grafica la amplitud del espectro en el eje vertical contra la frecuencia en el eje horizontal.....	115
6.4	Espectro de Fourier de la aceleración medida en el edificio 104. El periodo fundamental de este edificio fue recalculado. En esta figura se grafica la amplitud del espectro en el eje vertical contra la frecuencia en el eje horizontal.....	116
6.5	Gráfica de la relación de los periodos de un edificio de base flexible a base rígida en función del parámetro de rigidez relativa del suelo-estructura (ϕ). Se presentan cuatro curvas para diferentes relaciones de esbeltez (altura h entre radio r), considerando edificios de 12,24,48 y 60 metros de altura con un radio de 12 metros (Safina, 1996).....	118
6.6	Distribución de edificios de (a) hormigón armado y (b) mampostería tomados de una muestra arbitraria del Eixample de Barcelona.	121
6.7	Curvas de la degradación del módulo de cortante y del aumento del amortiguamiento para dos tipos de material constituyentes de suelos, arena y arcilla, en función de la deformación. El eje horizontal representa la deformación unitaria de cortante γ en porcentaje (Wakabayashi y Martínez, 1988).....	124

LISTADO DE TABLAS

	<i>página</i>
1.1 Periodos naturales, en segundos, medidos con vibración ambiental (AV-1, AV-2, AV-3, AV-4) y registros de terremotos (93-3, 93-4, 93-12, 94-1, 94-2, 95-1) (Meli y Faccioli, 1996).	7
1.2 Tipología y número de edificios estudiados por Bard et al (1992).	11
1.3 Relación de la frecuencia fundamental (Hz) de los edificios con la altura (m) y la dimensión en planta (m). f_0 es el valor promedio del conjunto de datos y σ_0 es la desviación estándar (ajuste logarítmico) correspondiente (Bard et al, 1992).	12
1.4 Periodos fundamentales (en segundos) del Hospital General de Mexicali, B.C., México, obtenidos a partir de mediciones antes (abril) y después (agosto) de modificaciones (Mendoza et al, 1991).	13
1.5 Frecuencias modales, en Hz, de un modelo matemático y tres pruebas de vibración (Torkamani y Ahmadi, 1988).	14
1.6 Comparación de los periodos (en segundos) experimentales y calculados de 13 edificios analizados. El segundo valor, en las columnas que aparece, se obtiene al considerar el efecto de interacción suelo-estructura. El signo + junto al número del edificio significa que está instrumentado para registrar terremotos y el signo * representa que fue reparado o reforzado después del sismo de 1985 (Muriá-Vila y González, 1995).	16
1.7 Algunas características del registrador TEAC XR-50.	39
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.	53
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.	53
3.3 Comparación de las frecuencias fundamentales de un grupo de 22 edificios de Adra obtenidos a partir del espectro de Fourier del sensor colocado en la parte superior de los edificios, con equipos de Barcelona (EB) y Almería (EA) y 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.	58
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_L y EA_L corresponden a las frecuencias longitudinales halladas con datos de los	

	equipos de Barcelona y Almería, EB_T y EA_T corresponden a las frecuencias en la dirección transversal. BA_L y BA_T son las diferencias, en %, entre las frecuencias determinadas con los equipos de Barcelona y Almería.....	61
4.1	Algunas características del modelo del edificio EM.....	66
4.2	Periodos fundamentales del edificio EM obtenidos a partir de la medición de la aceleración en su parte superior y del modelado numérico.....	67
4.3	Dimensiones de los perfiles HD de acero HSTAR 460 de 4600 kg/cm^2 de límite elástico.	70
4.4	Resultados del análisis dinámico realizado al edificio EH. Se presentan los periodos fundamentales en segundos y entre paréntesis las frecuencias en Hertz de los 4 primeros modos de vibración obtenidas con el modelado numérico y a partir de los espectros de Fourier de las aceleraciones medidas en la parte superior del edificio con un equipo unicanal y otro multicanal.	71
5.1	Relación de los 47 edificios de Barcelona utilizados para calcular las fórmulas empíricas. 25 edificios son de hormigón armado (H) y 22 de mampostería (M); ID es un número de identificación del edificio, T es la tipología, F_L es la frecuencia longitudinal, P_L es el periodo longitudinal, F_T y P_T son respectivamente la frecuencia y el periodo en la dirección transversal, N es el número de niveles y h es la altura en metros. Las dos últimas columnas contienen las dimensiones en planta mayor y menor respectivamente.....	78
5.2	Relación de ecuaciones ajustadas junto con un parámetro que las evalúa, la desviación estándar residual. Esta cantidad se obtiene de la tabla dividiendo el valor σ_R entre mil. En la primera columna se tienen los tipos y número de edificios considerados, hormigón armado, H, y mampostería, M.	80
5.3	Datos de los conjuntos de edificios clasificados por su tipología. El valor más bajo de la varianza residual media determina el mejor ajuste. Las últimas columnas muestran las ecuaciones ajustadas y bajo los coeficientes, sus errores estimados. También se añade la ecuación con el término constante igual a cero.....	93
5.4	Comparación de las fórmulas cuando se separa la componente longitudinal de la transversal, para todos los datos juntos, los que corresponden a edificios de hormigón y los correspondientes a los edificios de mampostería.	94
5.5	Fórmulas empíricas obtenidas para edificios de hormigón armado en Almería, Granada y Barcelona. La mayoría de los datos de Granada provienen de edificios utilizados como vivienda y el resto de hospitales, escuelas y oficinas, incluyendo algunos edificios especiales.....	95
5.6	Comparación de los valores de periodo fundamental de edificios de mampostería medidos (P) longitudinales y transversales, con los calculados mediante la norma española (P_c). Se incluyen también las diferencias porcentuales (%L, %T).....	95
5.7	Relación de etapas constructivas con la descripción de las obras efectuadas y las fechas en que se realizaron.	99

5.8	Valores de periodo fundamental longitudinal y transversal medidos en las etapas constructivas del edificio FU. Las columnas tercera y quinta muestran la variación respecto de la fase 1 del periodo longitudinal (VPL) y del periodo transversal (VPT).	102
5.9	Periodos propios y características básicas de 18 edificios seleccionados en Adra y 2 en Barcelona.	104
5.10	Resultados de dos modelos que relacionan el periodo fundamental (ambas componentes) con un grupo de variables que se consideran podrían ser importantes.	105
5.11	Coefficientes y sus errores cuando se realiza un ajuste lineal multivariante.	106
5.12	Comparación de los cuatro modelos finales, dos con ambas componentes del periodo fundamental juntas y dos con las componentes separadas.	107
6.1	Periodo propio de 28 edificios de Barcelona y periodo predominante de los suelos. Al medirse la aceleración en estos edificios se observó el periodo del suelo.	113
6.2	Evaluación del parámetro ϕ para los edificios ID utilizando la altura, la velocidad de onda s , y valores de periodo fundamental medidos en las direcciones longitudinal y transversal.	117
6.3	Edificios de hormigón armado de Barcelona a los que se les calculó el parámetro de rigidez relativa para evaluar la relevancia de la interacción suelo-estructura.	119
6.4	Edificios de mampostería de Barcelona a los que se les calculó el parámetro de rigidez relativa para evaluar la relevancia de la interacción suelo-estructura.	120
6.5	Las dos últimas columnas de esta tabla muestran el porcentaje de edificios de hormigón armado y mampostería para los cuales el periodo puede ser más de 50% del considerado y esto se deduce en función de los valores de la primera columna, la Figura 6.5 y las Tablas 6.3 y 6.4.	121
6.6	La mayoría de los edificios de hormigón de una muestra de 122 se distribuyen entre 6, 7 y 8 niveles de acuerdo con los porcentajes de esta tabla. Los valores de V_s corresponden, en edificios de hormigón y mampostería, a los mínimos para los cuales no habría interacción suelo-estructura.	122
6.7	Relación de los periodos fundamentales de 68 edificios medidos y de los periodos predominantes del suelo más cercanos a cada edificio.	123