

PROPIEDADES DINÁMICAS DE EDIFICIOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

David Murià Vila y Ricardo González Alcorta
Instituto de Ingeniería, UNAM

RESUMEN

En este trabajo se establecen las recomendaciones básicas para identificar las propiedades dinámicas de los edificios a partir de mediciones de vibración ambiental y registros sísmicos, y se comentan las ventajas y limitaciones de estas pruebas. Se presentan las propiedades dinámicas de 60 edificios de la ciudad de México medidas entre 1986 y 1994. Los resultados muestran que los periodos naturales de vibración son sensibles a las características de los suelos y de los sistemas estructurales. Se discuten, para diferentes sistemas estructurales, las relaciones obtenidas del periodo fundamental de vibrar en función del número de niveles, altura del edificio y densidad de muros, y se destaca la gran dispersión de los datos. Finalmente, se señalan las consideraciones de análisis generales que deben asumirse para lograr una modelación matemática representativa de las estructuras.

ABSTRACT

This study presents the basic recommendations to identify, from ambient vibration tests and seismic records, the dynamic properties of building structures. The advantages and limitations of these tests are discussed. The dynamic properties of 60 buildings located in Mexico City, obtained between 1986 and 1994, are presented. The results show that fundamental vibration periods are sensitive to the structural system and soil characteristics. Relations between fundamental periods and the number of stories, building height and wall density are evaluated and discussed. The high data dispersion is noted. Finally, structural analysis considerations to achieve representative mathematical models are pointed out.

INTRODUCCIÓN

El diseño de edificios requiere el uso de modelos matemáticos para predecir el comportamiento dinámico que pueden experimentar durante su vida útil; comúnmente, en ellos se consideran ciertas hipótesis en algunos aspectos estructurales en los cuales existen grandes incertidumbres de su comportamiento real ante excitaciones dinámicas, entre los que destacan los efectos de interacción suelo-estructura, los efectos de torsión, la flexibilidad del diafragma de piso, la efectividad de las juntas constructivas y la participación de los elementos no estructurales. El considerar en forma errónea la participación de estos aspectos estructurales puede conducir a estimaciones poco confiables de los periodos de vibración y amortiguamientos naturales de los edificios, parámetros importantes que gobiernan la respuesta dinámica de los mismos.

Ante la necesidad de llevar a cabo estudios experimentales enfocados a determinar las características dinámicas reales de las estructuras y con estos analizar los criterios usados en el modelaje matemático de edificios, el Instituto de Ingeniería de la UNAM (I de I) emprendió en 1986 una campaña de pruebas de vibración ambiental en edificios típicos ubicados en la ciudad de México. Dado que la determinación ambiental de las características dinámicas de edificios proporciona información del comportamiento estructural asociado a muy bajas amplitudes de excitación y ante la evidencia de que pueden sufrir variaciones significativas durante sismos intensos debido a un comportamiento no lineal y al deterioro de la rigidez de los sistemas estructurales, se llevaron a cabo instrumentaciones de edificios con aparatos de tipo permanente para el registro de movimientos sísmicos. En la actualidad el I de I cuenta con un catálogo de 60 edificios con mediciones de carácter ambiental y 6 edificios con registros sísmicos, de los cuales 3 de ellos están a cargo de Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES).

El objetivo de este artículo es el presentar la metodología desarrollada y los principales resultados encontrados en el estudio mencionado. Se discuten las relaciones obtenidas de los periodos fundamentales de vibración de los edificios con respecto a características geométri-

cas de los mismos (número de niveles, altura del edificio, altura-densidad de muros), y la variación que éstas presentan en función del tipo de estructuración y tipo de suelo sobre el cual se desplantan. Además, se plantean las consideraciones de análisis más importantes para lograr una buena correlación entre las características dinámicas obtenidas teórica y experimentalmente.

EDIFICIOS ESTUDIADOS

Para la selección de los edificios en los cuales se realizarían las pruebas se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Que fueran edificios de concreto reforzado y de preferencia que tuvieran entre 5 y 15 niveles, por ser estos más susceptibles a los efectos dinámicos y, por tanto, los que han sufrido mayores daños durante movimientos sísmicos intensos.
- Que tuvieran una estructuración simple, regular y simétrica, y preferentemente no presentaran daño estructural.
- Que estuvieran desplantados en los diferentes suelos característicos de la ciudad de México.
- Que hubiera una documentación completa del proyecto estructural.
- Que existieran facilidades de acceso a las construcciones por parte de los propietarios.

Del total de edificios estudiados se seleccionaron 60 de ellos, de los cuales 15 están desplantados sobre suelo firme y 45 sobre suelo blando. Además 8 de ellos cuentan con una instrumentación para registrar movimientos sísmicos. De los edificios ubicados sobre suelo blando, 8 tienen diferentes niveles de daño estructural. En la tabla 1 se presenta una descripción de las principales características geométricas y estructurales de los edificios seleccionados.

PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

Este método experimental consiste en medir las vibraciones en las estructuras producidas por excitaciones de carácter ambiental, como lo son las producidas por el tránsito de vehículos y

Tabla 1. Características estructurales y propiedades dinámicas de los edificios estudiados

EDIF.	N	ESTRUCTURACIÓN		AÑO DE CONST.	DIMENSIONES (m)			D		CIMEN- TACIÓN	PERIODOS (s) Y AMORTIGUAMIENTO (%)					
		T	L		H	T	L	T	L		T _T	ξ _T	T _L	ξ _L	T _R	T _{suelo}
EDIFICIOS EN SUELOS FIRMES																
1	3	C+MM, LR	C, LR	1980	8.70	9.70	27.00	0.015	---	LC	0.24	1-2	0.25	1-2	0.16	< 0.5
2	3	C+MC, LR	C, LR	1975	9.45	12.00	54.00	---	---	Z	0.25	---	0.36	---	0.21	< 0.5
3	4	C+MC, LMT	C+MC, LMT	1977	12.60	14.40	48.60	---	---	Z	0.26	2.1-2.6	0.33	1.8-2.3	0.22	< 0.5
4	5	MM, LV	MM, LV	1986	12.17	7.10	16.10	---	---	LC	0.19	1.3-1.4	0.18	1.1-1.3	0.14	< 0.5
5	5	MM, LV	MM, LV	1986	12.17	7.10	16.10	0.049	0.034	LC	0.20	1.3-1.4	0.19	1.1-1.3	0.14	< 0.5
6	5	MM, LV	MM, LV	1986	12.17	7.10	16.10	0.049	0.034	LC	0.19	1.3-1.4	0.18	1.1-1.3	0.14	< 0.5
7	5	MM, LV	MM, LV	1986	12.17	7.10	16.10	0.049	0.034	Z	0.22	1.3-2.3	0.20	2-2.5	0.14	< 0.5
8	5	MM, LV	MM, LV	1986	12.17	7.10	16.10	0.049	0.034	Z	0.22	1.3-2.3	0.19	2-2.5	0.14	< 0.5
9	7	C, LR	C, LR	1977	26.23	153.72	153.72	---	---	Z	0.74	---	0.74	---	0.46	< 0.8
10	8	C, LPR	C+M, LPR	1980	27.87	25.42	26.95	---	0.016	Z+P	0.54	2-3	0.31	2-3	0.25	< 0.5
11	17	C, LR	C, LR	1950	44.48	13.50	40.50	---	---	CC	1.25	2	0.83	2	0.74	< 0.5
12	16	C+LR+MM	C+LR+MM	1982	37.00	34.00	34.00	---	---	P	1.37	1.0	1.16	1.0	1.59	< 0.5
13	16	C+LR+MM	C+LR+MM	1982	37.00	34.00	34.00	---	---	P	1.37	1.0	1.28	1.0	1.72	< 0.5
14	18	C+LR+MM	C+LR+MM	1991	50.00	34.00	34.00	---	---	P	1.16	1.0	1.16	1.0	---	< 0.5
15	18	C+LR+MM	C+LR+MM	1991	50.00	34.00	34.00	---	---	P	1.28	1.0	1.16	1.0	0.96	< 0.5
EDIFICIOS EN SUELOS BLANDOS																
16	1	C, LP	C, LP	1986	3.20	12.00	39.00	---	---	LC	0.12	---	0.13	---	---	4.0
17	2	C, LP	C, LP	1986	6.38	12.00	39.00	---	---	LC	0.27	---	0.24	---	---	3.5
18	2	C+MC	C+MC	1986	5.80	11.90	36.40	0.004	0.011	CC	0.14	---	0.14	---	---	2.0
19	3	C, LP	C, LP	1986	9.60	12.00	39.00	---	---	CT+PF	0.31	---	0.43	---	---	4.0
20	3	C+MC	C+MC	1986	8.95	12.00	39.00	0.004	0.011	CC	0.21	---	0.22	---	---	2.0
21	3	CA+MC, LMT	CA+MC, LMT	1987	11.65	8.00	29.16	0.023	0.009	CC	0.34	18-31	0.24	6-13	0.17	2.1
22	4	MM, LP	MM, LP	1964	10.08	7.60	96.60	0.051	0.043	LC	0.49	---	0.19	---	---	3.1
23	4	C+MM, LMT	C+MM, LMT	1985	21.76	16.80	36.00	0.009	0.017	C+PP	0.72	---	0.43	---	0.35	> 1.8
24	4	CM+MC+MM, LMT	CM+MC+MM, LMT	1985	21.76	16.80	36.00	0.010	0.014	CC+PF	1.38	---	1.92	---	2.80	> 1.8
25	4	C+MM, LMT	C+MM, LMT	1985	21.76	16.80	36.00	0.009	0.017	CC+PF	1.70	---	---	---	3.48	> 1.8
26	4	C+MM, LMT	C+MM, LMT	1985	21.76	16.80	45.00	0.007	0.018	CC+PF	1.44	---	2.20	---	2.80	> 1.8
27	5	C, LPR	C, LPR	1986	19.65	14.70	71.03	---	---	LC	0.43	2-3	0.78	2-3	0.52	1.0
28	5	MM, LV	MM, LV	1986	12.17	7.10	16.10	0.049	0.034	CC	0.40	---	0.33	---	0.15	3.1
29	5	MM, LV	MM, LV	1986	12.17	7.10	16.10	0.049	0.034	CC	0.40	---	0.33	---	0.12	3.1
30	5	MM, LV	MM, LV	1986	12.17	7.10	16.10	---	---	CC	---	---	---	---	0.12	> 2.0

Δ EDIFICIO REPARADO O RESTRUCTURADO DESPUÉS DE 1985

* EDIFICIOS DAÑADOS

T - TRASVERSAL (menor dimensión)

L - LONGITUDINAL (mayor dimensión)

R - TORSIÓN

D - DENSIDAD DE MUROS

N - NÚMERO DE NIVELES

H - ALTURA DEL EDIFICIO

Z - ZAPATAS

C - MARCOS DE CONCRETO

CM - MARCOS DE CONCRETO CON CONTRAVENTE

CA - MARCOS DE ACERO EMBEBIDO EN CONCRETO

LMT - LOSA MACIZA CON TRABES

LP - LOSA PLANA

LR - LOSA RETICULAR

LV - LOSA DE VIGUETA Y BOVEDILLA

LPR - LOSA PREFABRICADA

MC - MUROS DE CONCRETO

CC - CAJÓN DE CIMENTACIÓN

CT - CONTRA TRABES

LC - LOSA DE CIMENTACIÓN

PF - PILOTES DE FRICCIÓN

PP - PILOTES DE PUNTA

P - PILAS

MM- MUROS DE MAMPOSTERÍA

PR- TRABES PRETENSADAS

Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México

Tabla 1. Continuación

EDIF.	N	ESTRUCTURACIÓN		AÑO DE CONST.	DIMENSIONES (m)			D		CIMEN-TACIÓN	PERIODOS (s) Y AMORTIGUAMIENTO (%)					
		T	L		H	T	L	T	L		T _T	ξ _T	T _L	ξ _L	T _R	T _{suelo}
31	5	MM, LV	MM, LV	1985	12.17	7.10	16.10	---	---	CC	---	---	---	---	0.15	> 2.0
32	5	MM, LV	MM, LV	1985	12.17	7.10	16.10	---	---	CC	---	---	---	---	0.14	> 2.0
33	6	C+MM, LMT	C+MM, LMT	1954	24.20	14.80	56.50	0.005	0.005	CC	0.56	---	0.33	---	0.28	2.0
34	6	C+MM, LMT	C+MM, LMT	1954	24.20	14.80	56.50	0.005	0.005	CC	0.53	---	0.36	---	0.34	2.0
35	6	C+MM, LMT	C+MM, LMT	1954	24.20	15.00	24.80	0.005	0.011	CC	0.37	---	0.38	---	0.16	2.0
36	6	C+MM, LMT	C+MM, LMT	1954	24.20	17.00	69.00	0.008	0.005	CC	0.47	---	0.37	---	0.37	2.0
37*	7	C+MM, LR	C+MM, LR	< 1980	23.10	26.80	34.66	0.008	---	CC+PF	2.10	---	1.30	---	---	---
38	8	C, LR	C, LR	< 1980	24.00	13.81	36.35	---	---	CC+PF	1.14	---	0.78	---	0.63	---
39	8	C+MM, LPR	C+MM, LPR	1970	24.00	10.00	25.00	---	0.310	CC+PF	0.74	3	0.45	3	0.30	1.0
40	8	C, LMT	C, LMT	1969	29.75	22.20	29.50	0.010	0.006	CC	0.89	---	1.00	---	0.63	2.0
40	8	MC, LMT	CM, LMT	1969	29.75	22.20	29.50	0.010	0.006	CC	0.44	---	0.53	---	0.28	2.0
41	9	C+MM, LR	C, LR	< 1980	24.05	9.70	14.60	---	0.028	LC+PP	1.14	---	0.81	---	0.60	1.2
42	9	C+MM, LV	C+MM, LV	1977	24.50	9.40	23.20	0.012	0.030	LC+PF	1.56	---	0.89	---	0.54	1.4
43	10	C+MM, LR	C+MM, LR	< 1980	30.00	36.26	53.48	---	---	CC	1.55	---	1.53	---	---	1.0
44	11	C, LR	C+MM, LR	1968	30.05	13.60	27.85	---	0.020	CC+PF	1.14	---	0.93	---	0.66	1.9
45*	11	C, LV	C, LV	< 1980	37.40	14.20	67.70	---	---	LC+PF	2.08	---	1.56	---	0.54	1.5
46	11	C+PR, LR	C+PR, LR	1973	33.55	13.60	28.80	---	0.021	LC+PF	1.39	4-5	0.83	4-5	0.78	2.1
47*	12	C+MC, LR	C+MC, LR	< 1980	39.60	14.70	30.00	0.005	0.009	CC+PF	2.30	---	1.70	---	---	---
48*	13	C, LR	C, LR	< 1980	45.00	31.60	38.35	---	---	CC+PF	2.50	---	2.50	---	0.63	2.4
49	14	C+PR, LR	C+PR+MC, LR	1981	42.20	19.60	32.00	---	0.015	CC+PF	2.27	5-7	1.37	5-7	1.25	2.0
50	14	C, LMT	C+MC, LMT	< 1980	43.80	12.30	20.30	---	0.023	CC+PF	1.67	---	1.14	---	0.70	2.3
51*	14	C, LV	C, LV	< 1980	51.00	19.60	31.00	---	---	CC+PF	2.50	---	1.47	---	0.66	2.2
52*	14	C, LMT	C+MC, LMT	< 1980	65.20	22.73	35.94	---	---	CC+PF	2.08	---	2.08	---	0.52	1.4
53	15	C, LR, LP	C, LR, LP	1969	45.00	9.60	19.00	---	---	CC+PF	1.43	---	1.19	---	0.76	1.5
54	15	M+MC, LMT	M+MC, LMT	1968	44.00	62.62	72.30	0.005	0.005	CC+PF	1.92	---	2.00	---	1.47	1.5
55*	16	C+MC, LR	C+MC, LR	< 1980	52.60	37.85	45.60	---	---	CC+PF	2.60	---	2.10	---	---	---
56	16	C, LR	C, LR	< 1980	64.00	30.10	53.55	---	---	CC+PF	2.08	---	1.78	---	0.45	1.2
57	18	C+MC, LR	C+MC, LR	< 1982	46.80	18.65	39.00	0.006	0.005	CC+PF	1.79	---	1.79	---	1.25	2.4
58	19	C+MC, LMT	C+MC, LMT	< 1980	78.80	30.00	42.75	0.007	0.010	CC+PF	2.50	---	1.79	---	0.48	2.4
59	20	C, LV	C+MC, LV	1979	57.60	17.80	37.50	---	0.022	CC+PF	2.50	---	1.78	---	1.39	2.0
60	20	C, LR	C, LR	1966	51.34	19.60	14.64	---	---	CC+PF	3.13	---	2.50	---	1.92	2.0

Δ EDIFICIO REPARADO O RESTRUCTURADO DESPUÉS DE 1985

* EDIFICIOS DAÑADOS

T - TRASVERSAL (menor dimensión)

L - LONGITUDINAL (mayor dimensión)

R - TORSIÓN

D - DENSIDAD DE MUROS

N - NÚMERO DE NIVELES

H - ALTURA DEL EDIFICIO

Z - ZAPATAS

C - MARCOS DE CONCRETO

CM - MARCOS DE CONCRETO CON CONTRAVENTE

CA - MARCOS DE ACERO EMBEBIDO EN CONCRETO

LMT - LOSA MACIZA CON TRABES

LP - LOSA PLANA

LR - LOSA RETICULAR

LV - LOSA DE VIGUETA Y BOVEDILLA

LPR - LOSA PREFABRICADA

MC - MUROS DE CONCRETO

CC - CAJÓN DE CIMENTACIÓN

CT - CONTRA TRABES

LC - LOSA DE CIMENTACIÓN

PF - PILOTES DE FRICCIÓN

PP - PILOTES DE PUNTA

P - PILAS

MM- MUROS DE MAMPOSTERÍA

PR- TRABES PRETENSADAS

David Muria Vila y Ricardo González Alcoria

el viento, por lo que es un método simple y rápido en la obtención de datos, con la ventaja de no interferir en las actividades normales que se realizan en los inmuebles.

Equipo utilizado

Se diseñó y construyó un sistema de adquisición de datos que permite capturar simultáneamente las vibraciones en ocho puntos de la estructura (Murià Vila y Moreno, 1994). En cada punto de medición elegido se coloca un servo-acelerómetro de alta resolución para detectar y adquirir las señales de ruido ambiental, cuyas amplitudes son entre 10^{-4} y 10^{-5} g. Estas señales son transmitidas, a través de cables blindados, a unos acondicionadores donde se amplifican; se filtran las frecuencias mayores de 30 Hz. Las señales acondicionadas se envían a una microcomputadora tipo PC-486 en donde se almacena toda la información. Se cuenta con un analizador de espectros de dos canales, con el cual se monitorea la evolución de los espectros durante la prueba. En la fig 1 se muestra un diagrama de bloques del dispositivo empleado.

Selección de puntos

Para la obtención de las frecuencias y configuraciones modales en traslación, se colocan los acelerómetros cerca de los centros geométricos de la estructura, manteniendo el de referencia en la azotea, en tanto que los otros se localizan en los niveles intermedios. Los modos torsionales de vibración se determinan a partir de registros obtenidos de acelerómetros colocados en los extremos de cada nivel elegido.

En los edificios que pueden tener diafragmas de piso flexibles, el número de puntos de observación en planta debe incrementarse, colocando en la azotea dos sensores en los extremos y un número de puntos intermedios en función de los modos de vibración que se pretendan identificar. En los casos estudiados, que presentaron esta característica, el número de puntos intermedios fue igual o menor de tres.

En edificios donde se pretenden evaluar los efectos de interacción suelo-estructura es necesario incrementar el número de puntos de medi-

ción, ubicándose estos de tal manera que se detecte con claridad la influencia de la flexibilidad del terreno en las características dinámicas del sistema estructural. Se recomienda colocar sensores en el terreno adyacente a la estructura y en la base de su cimentación.

Interpretación de resultados

El procesamiento de la información consistió en un análisis de señales aleatorias estacionarias (Bendat y Piersol, 1989) para obtener los espectros de potencia promedio, así como las correspondientes funciones de transferencia (en fase y amplitud) y de coherencia entre pares de señales. El programa de captura y procesamiento se explica con detalle en el informe de Guzmán *et al* (1992).

Para identificar las frecuencias naturales de vibrar es importante utilizar las funciones de transferencia y coherencia, de lo contrario podrían cometerse errores 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, como son por ejemplo las ordenadas asociadas a vibraciones de estructuras vecinas y de equipo electromecánico.

En ciertas ocasiones es posible obtener fracciones de amortiguamiento crítico de los modos fundamentales aplicando el procedimiento propuesto por Kawasumi y Shima (1965) o el calculado a partir del factor de amplificación dinámico, siempre y cuando se cumplan las condiciones señaladas por Bendat y Piersol (1980). Es importante recordar que la estimación de este valor es sensible a las características del movimiento, el suelo y la estructura, así como de la calidad de los registros y el procesamiento de la información.

Resumen de resultados

En estructuras altas, flexibles y con sistemas de piso prácticamente indeformables en su plano se obtuvieron espectros bien definidos por medio de los cuales fue posible detectar, al menos, las tres primeras frecuencias de vibración en cada dirección. En estructuras regulares, la

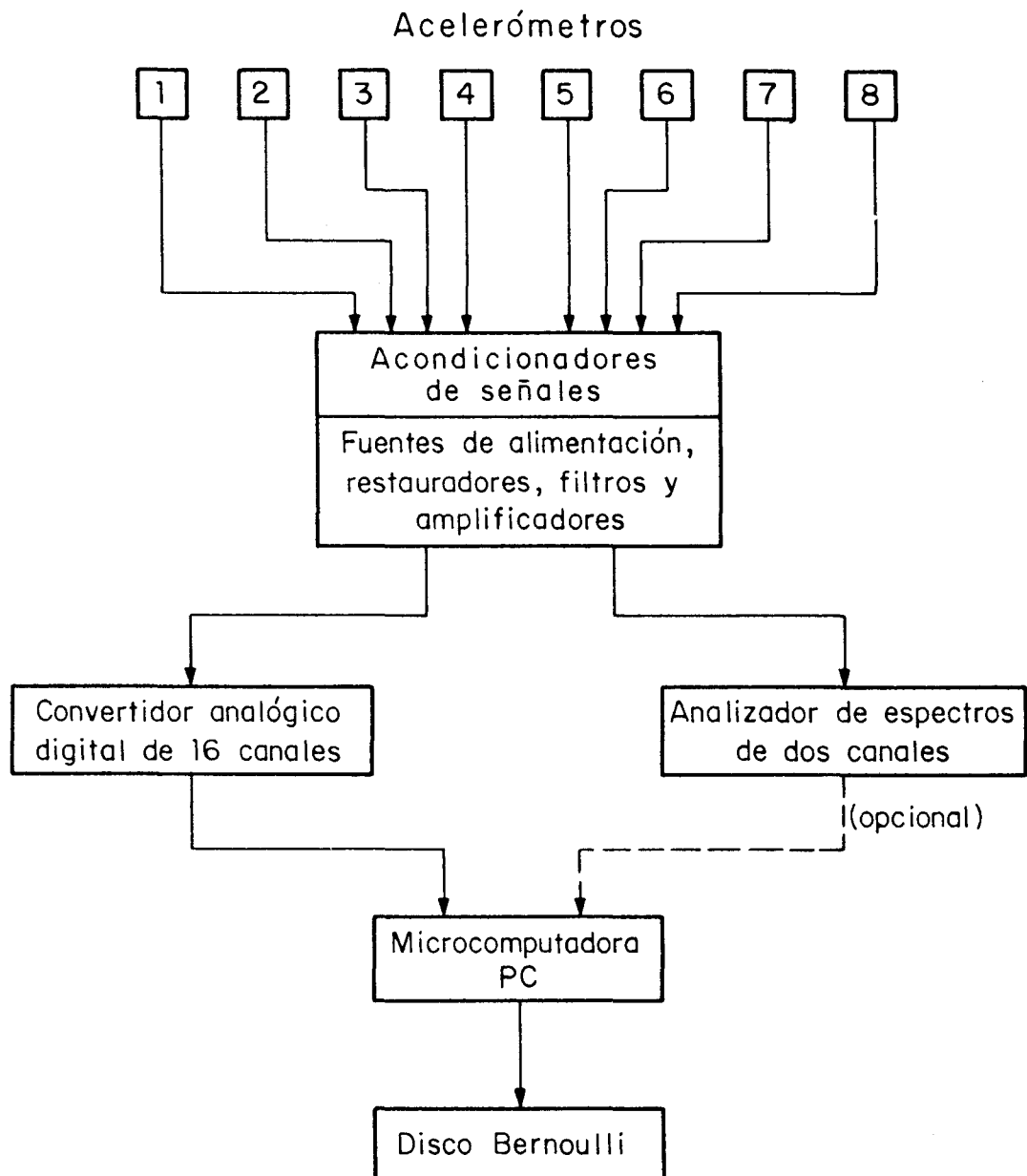


Fig 1. Diagrama de bloques del dispositivo experimental

experiencia mostró que es suficiente analizar dos niveles intermedios ubicados aproximadamente a un tercio y dos tercios de la altura total del edificio, adicionalmente a los de la azotea y de la base, con el fin de determinar los tres primeros modos de vibrar en sus direcciones principales. En caso de estructuras irregulares en elevación, el número de niveles

intermedios a considerar para lograr trazar las formas modales, depende fundamentalmente de cambios notables de rigidez y de masa.

En la fig 2 se presentan los puntos elegidos en dos edificios estudiados: uno de 14 niveles desplantado en suelo blando, donde los efectos de interacción suelo-estructura se manifiestan

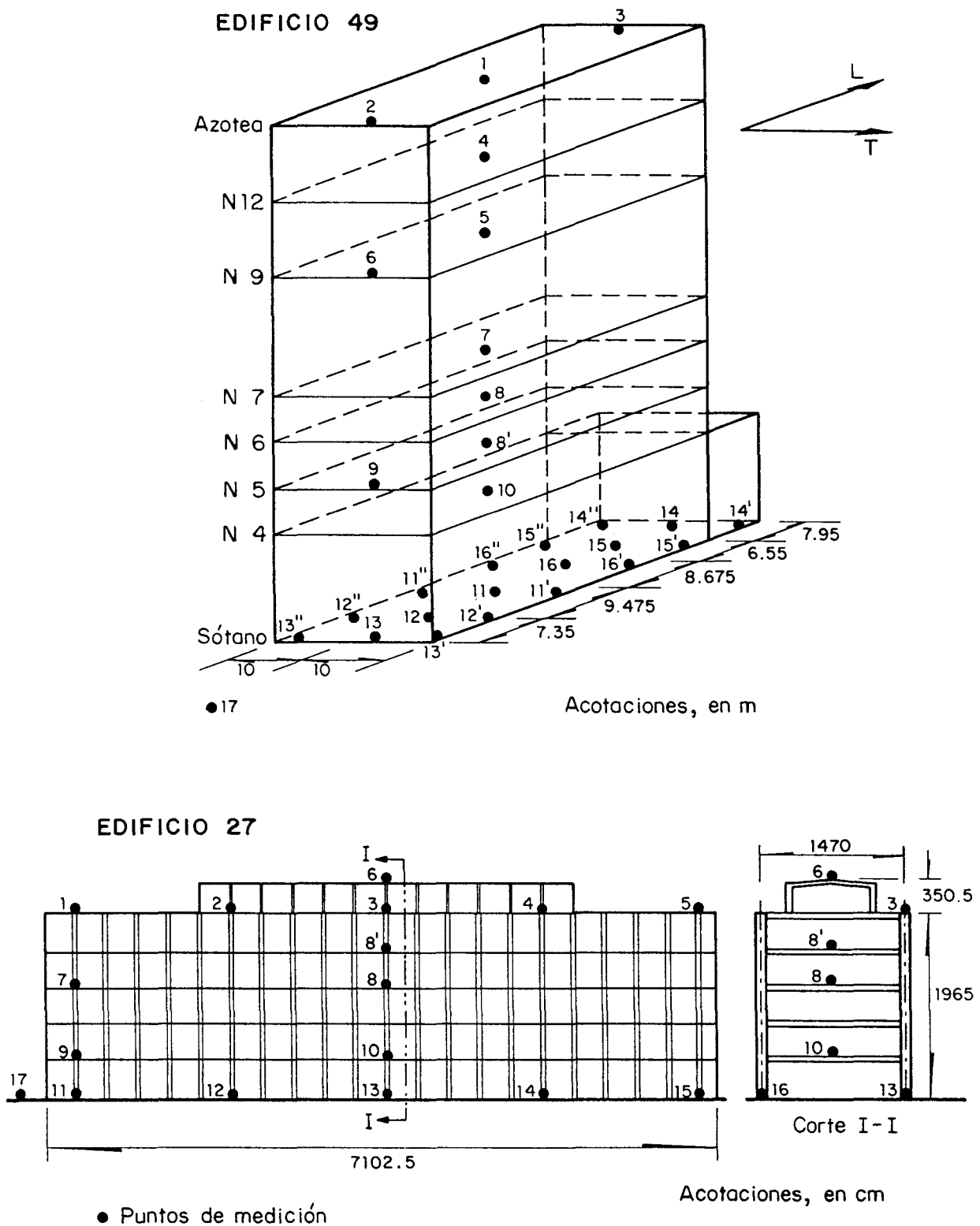


Fig 2. Localización de puntos de medición para pruebas de vibración ambiental en dos edificios

por traslaciones y giros en su base, además de detectarse deformaciones relativas en el cajón de cimentación (Murià Vila y Moreno, 1994), y otro de 5 niveles cuyos diafragmas de piso manifestaron flexibilidad en su plano (Murià Vila y González, 1990). Se realizaron varias pruebas con diferentes arreglos de los sensores, cambiándolos de dirección y posición, manteniendo en todas las pruebas uno o dos puntos como referencia, con el fin de obtener las formas modales de la estructura. En las figs 3 a 5 se muestran los modos identificados en los edificios.

La aplicación de pruebas de vibración resulta ser útil para evaluar los cambios en las características dinámicas de edificios rehabilitados o restructurados. En la fig 6 se comparan las funciones de transferencia entre azotea y sótano obtenidas antes y después de la restructuración del edificio 40 (Murià Vila *et al*, 1994). En ellas se aprecia claramente que en las frecuencias asociadas las ordenadas máximas del edificio restructurado aumentaron significativamente.

En general, el análisis mostró ser adecuado para determinar las frecuencias y los modos de vibrar de edificios, cuando se realizaron promedios de 12 a 40 eventos, con una duración de evento superior a 20 veces el mayor periodo fundamental de vibrar de la estructura y con una resolución en frecuencia (Δf) congruente con la menor frecuencia de interés (f), es decir $f/\Delta f \geq 10$.

Las frecuencias y formas modales que se obtienen del análisis por vibración ambiental son en general similares a las obtenidas en estos edificios al aplicar pruebas de impulsos (Murià Vila, 1991; Murià Vila *et al*, 1993) y pruebas de tracción (Murià Vila *et al*, 1993).

La identificación de las propiedades dinámicas de edificios muy rígidos desplantados en suelos arcillosos se dificulta dada la gran deformabilidad del suelo sobre el cual se desplantan, en contraste con la pequeña deformabilidad de la estructura. Estas condiciones hacen que la estructura se mueva prácticamente como un cuerpo rígido y en consecuencia se reflejen esencialmente las vibraciones del suelo, producidas por el tránsito de vehículos, por lo que ni al recurrir a la función de transferencia se logra detectar claramente las frecuen-

cias naturales de vibrar del sistema suelo-estructura. Para estos casos se deben realizar pruebas de campo como son las de impulsos (Murià Vila, 1991; Murià Vila *et al*, 1993), de tracción (Del Valle y Prince, 1965; Murià Vila *et al*, 1993) o vibración forzada (Del Valle y Prince, 1965; Foutch *et al*, 1993).

ANÁLISIS DE REGISTROS SÍSMICOS

Este método experimental consiste en registrar los movimientos provocados por los sismos, por lo que tiene la ventaja de poder estudiar el comportamiento dinámico de edificios cuando estos se someten a amplitudes de excitación mucho mayores que las que se presentan con ruido ambiental. La realización de este tipo de pruebas experimentales requieren una inversión mayor en tiempo y costo de equipo, por lo que su aplicación es sensiblemente más restringida que las pruebas ambientales.

Equipo utilizado

Uno de los principales instrumentos utilizados para el registro sísmico es el acelerógrafo, el cual es diseñado para registrar la aceleración del sitio en donde está colocado, en tres direcciones ortogonales.

Selección de puntos

El criterio para elegir los puntos de medición es similar al seguido en las pruebas de vibración ambiental, pero surge una limitante económica que impide cubrir todos los puntos de interés. Como mínimo se debe contar con acelerógrafos en campo cercano al edificio y en la azotea del mismo, a fin de analizar el comportamiento global del sistema estructural. Además, si se pretende obtener información de modos superiores es necesario instrumentar niveles intermedios del edificio.

En edificios desplantados en suelos blandos se sugiere instrumentar la base de su estructura de tal forma que sea posible evaluar los efectos de interacción suelo-estructura. En el caso de edificios de planta rectangular se requiere de

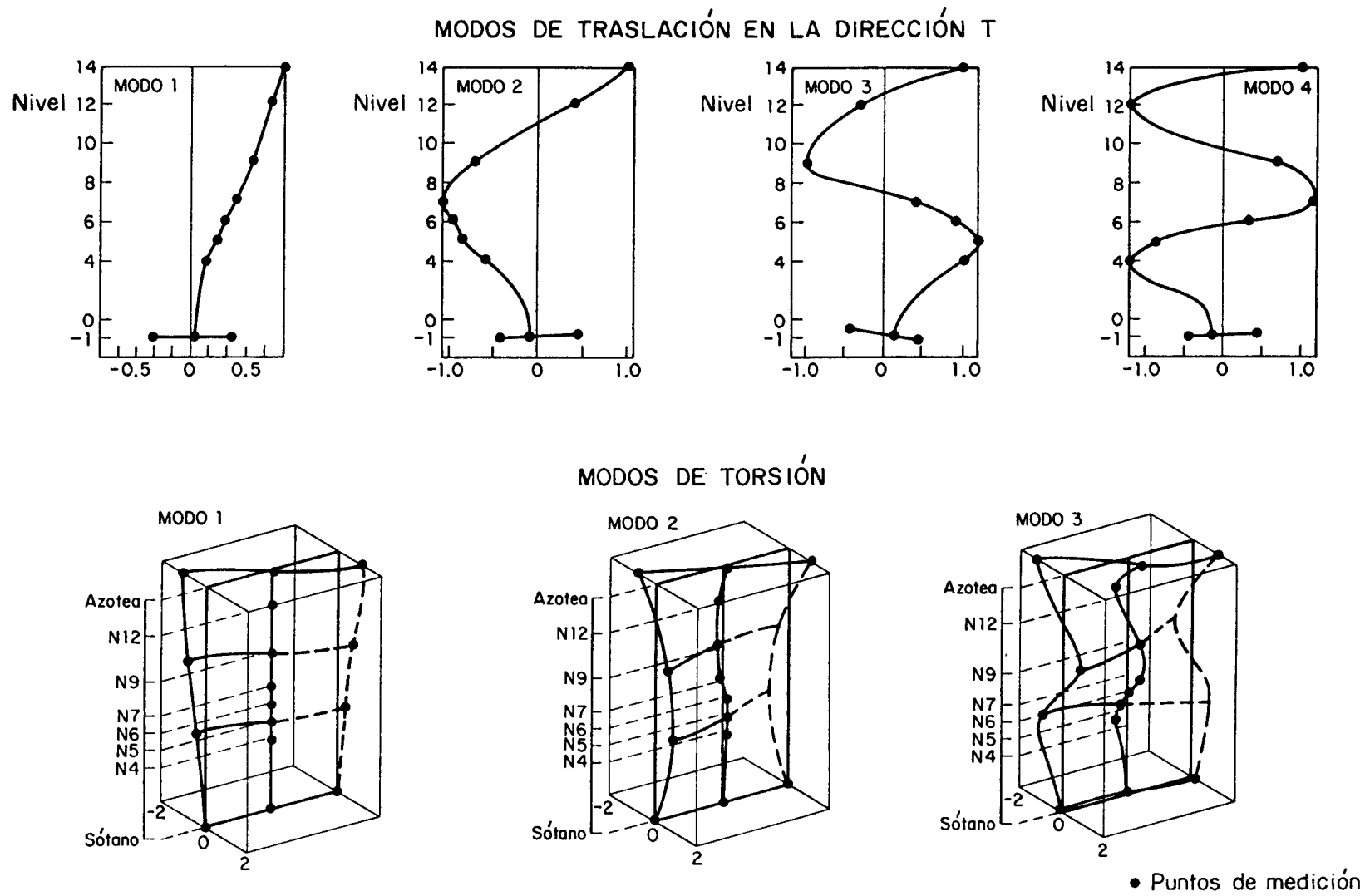


Fig 3. Formas modales obtenidas en el edificio 49

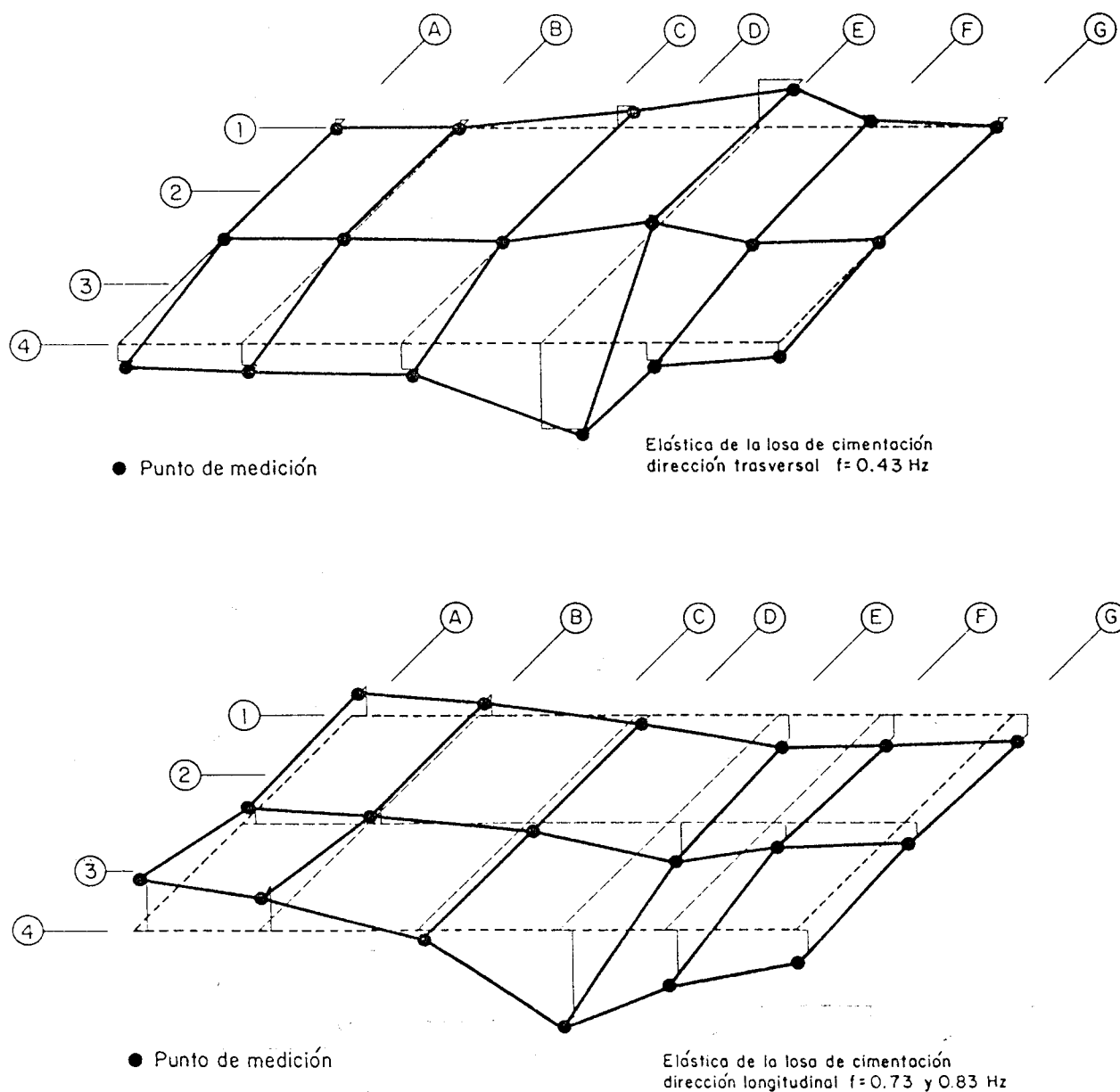


Fig 4. Elásticas tridimensionales de la losa de cimentación correspondiente a los modos fundamentales del edificio 49

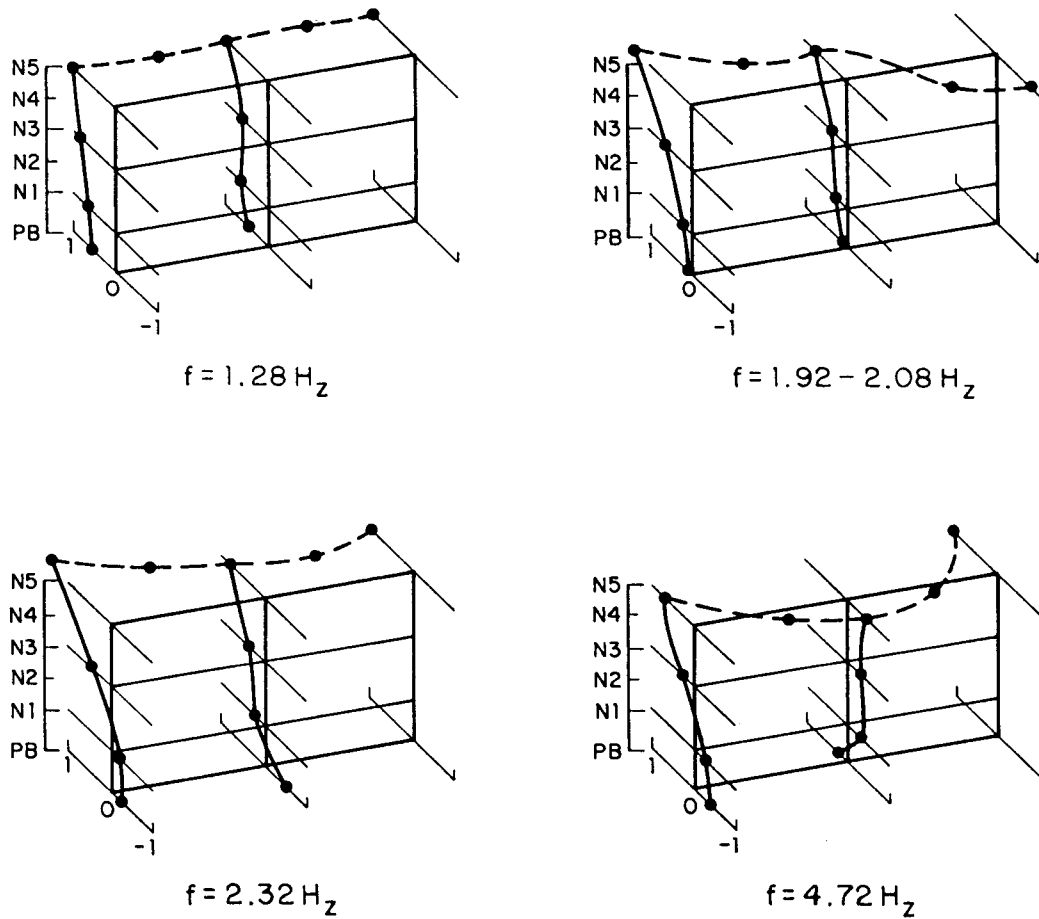


Fig 5. Formas modales obtenidas en el edificio 27

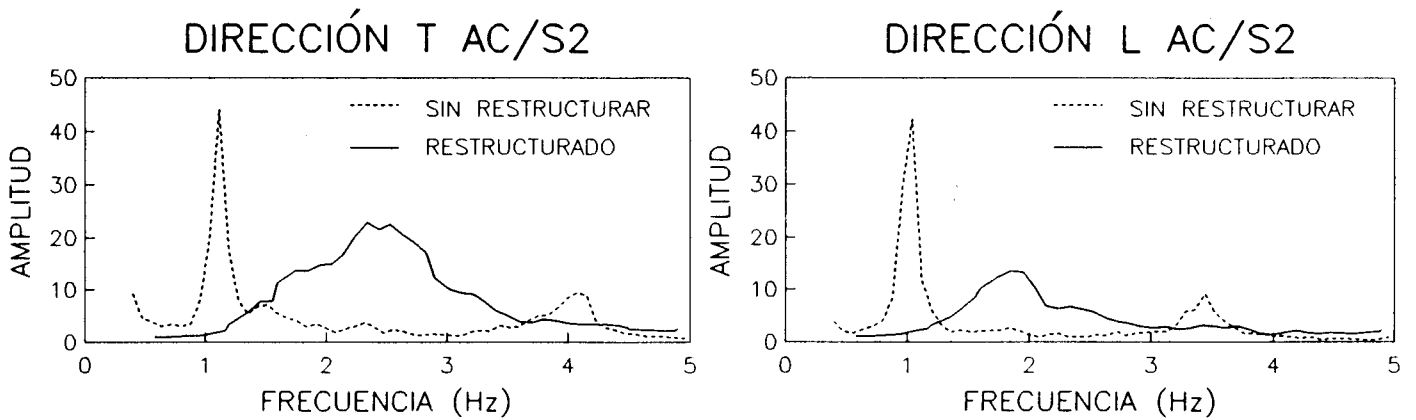


Fig 6. Comparación de las funciones de transferencia obtenidas de las pruebas de vibración ambiental, antes y después de la restructuración (AC-azotea centro, S2-sótano nivel andén)

al menos tres aparatos ubicados en sendas esquinas y así poder estimar los movimientos de cabeceo alrededor de los ejes longitudinal y transversal. En la fig 7 se presenta esquemáticamente una distribución de instrumentos diseñada para cumplir dichos objetivos.

Uno de los edificios que cuenta con una de las instrumentaciones más ambiciosas logradas en el país es el descrito por Murià Vila y

Meli (1994), la cual se concibió para que registre las vibraciones de movimientos de traslación horizontal y vertical en diferentes puntos del edificio, de tal forma que en el análisis se puedan determinar los modos de vibración más significativos, incluyendo los correspondientes a torsión, así como evaluar los efectos de interacción suelo-estructura y los de amplificación de las ondas sísmicas desde los depósitos firmes profundos hacia la superficie.

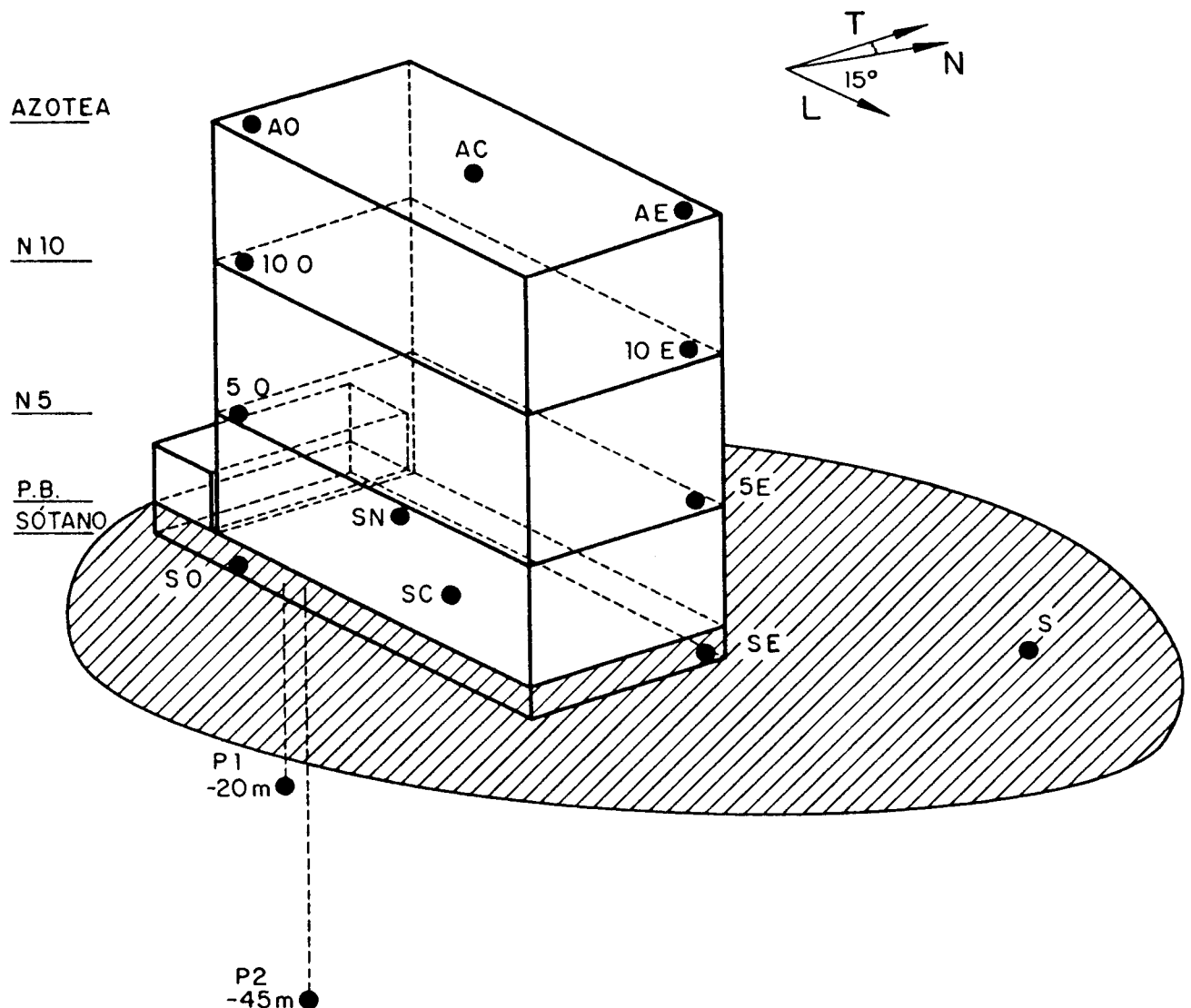


Fig 7. Croquis de la estructura del edificio mostrando la localización de la instrumentación

Antes de instrumentar un edificio es recomendable determinar mediante pruebas de vibración ambiental las características dinámicas de la estructura, para contar con información *a priori* de las características dinámicas del edificio, ya que serán las referencias para monitorear dichas características, y además podrán servir de base para la elección de los niveles en donde se colocarán los instrumentos.

Interpretación de resultados

Los acelerogramas que se graban en cada aparato son recuperados para editarlos y así asignar las características de cada estación (clave, nombre y lugar) y de cada instrumento (tipo de equipo, sensor, orientación y sensibilidad).

El procesamiento de los datos consiste en los pasos siguientes:

- Examinar los acelerogramas de un mismo evento para evaluar la calidad de los registros y para sincronizarlos con base en la señal común del tiempo.
- Efectuar la corrección de línea base para determinar el eje de aceleración cero, y eliminar los componentes frecuenciales que no son de interés al aplicar un filtro pasa banda entre 0.10 y 30 Hz.
- Integrar los acelerogramas corregidos para obtener las historias de velocidades y desplazamientos. En el cálculo se supone que las amplitudes varían linealmente entre dos puntos consecutivos.

Para estudiar el comportamiento sísmico de los edificios instrumentados se analizan los datos en los dominios del tiempo y la frecuencia, para determinar diversas características estructurales, entre las que destacan las frecuencias y modos naturales de vibración, amortiguamientos modales, acortamiento de columnas, distorsiones de entrepiso, así como los efectos de torsión y de interacción suelo-estructura. En el análisis de los registros sísmicos se aplican dos técnicas de identificación:

- Técnicas no paramétricas en las cuales no se emplea explícitamente un modelo matemático, sino que se determinan características dinámicas del sistema estructural a partir de

un análisis espectral (Bendat y Piersol, 1989; Murià Vila y Moreno, 1994) y el uso de métodos simplificados para evaluar los efectos de interacción suelo-estructura (Luco, 1980).

- Técnicas paramétricas donde se establece un modelo matemático del edificio y se estiman los valores de los parámetros estructurales necesarios para producir una óptima correlación entre la respuesta medida y la calculada analíticamente (González, 1993).

Resumen de resultados

El análisis de los registros sísmicos obtenidos en los edificios instrumentados (Contreras y Murià Vila, 1993; Murià Vila *et al.*, 1992; Murià Vila *et al.*, 1993; Murià Vila *et al.*, 1994; Murià Vila y Meli, 1994) revelan que las amplitudes de aceleración son más de 100 veces superiores a las medidas en vibración ambiental, y las frecuencias naturales de vibración obtenidas durante los eventos sísmicos pueden, en ciertos casos, diferir significativamente de las determinadas con los registros de vibración ambiental como se aprecia en la tabla 2. Se evidenció que dichas variaciones dependen sensiblemente de la intensidad sísmica (Murià Vila y Meli, 1994). Las formas modales obtenidas de los registros sísmicos y de vibración ambiental en dichos edificios resultaron ser similares para los eventos mencionados (fig 8; Murià Vila y Meli, 1994).

La inspección de los edificios después de la ocurrencia de los sismos registrados hasta la fecha indica que no se presenta un daño aparente en los mismos, por tanto estas fluctuaciones de las frecuencias naturales de vibración se atribuyen probablemente a diversas fuentes de no linealidad en el edificio y a la interacción suelo-estructura, en caso de estar cimentados en suelos blandos. Para las primeras se destacan: el módulo de elasticidad de los materiales, que en general es dependiente del nivel de esfuerzo, el grado de acoplamiento entre elementos estructurales, el agrietamiento de los elementos estructurales y el grado de participación de elementos no estructurales. Para las segundas se distingue la discontinuidad en la interfaz cimentación-suelo.

Tabla 2. **Parámetros identificados experimentalmente del edificio 49**

TIPO DE EVENTO	FECHA	FRECUENCIAS (Hz)		$A_{máx}$ (cm/s ²)	$\gamma_{máx}$ (x10 ⁻³)
		L	T		
VIBRACIÓN AMBIENTAL	23/sep/92	0.73	0.44	<0.1	--
SISMO	15/may/93	0.65	0.37	11	0.46
SISMO	15/may/93	0.61	0.35	28	0.94
SISMO	24/oct/93	0.57	0.35	56	1.42
VIBRACIÓN AMBIENTAL	25/nov/93	0.70	0.44	<0.1	--

L - LONGITUDINAL

T - TRASVERSAL

$A_{máx}$ - ACELERACIÓN MÁXIMA EN EL EDIFICIO

$\gamma_{máx}$ - DISTORSIÓN MÁXIMA DE ENERGÍA

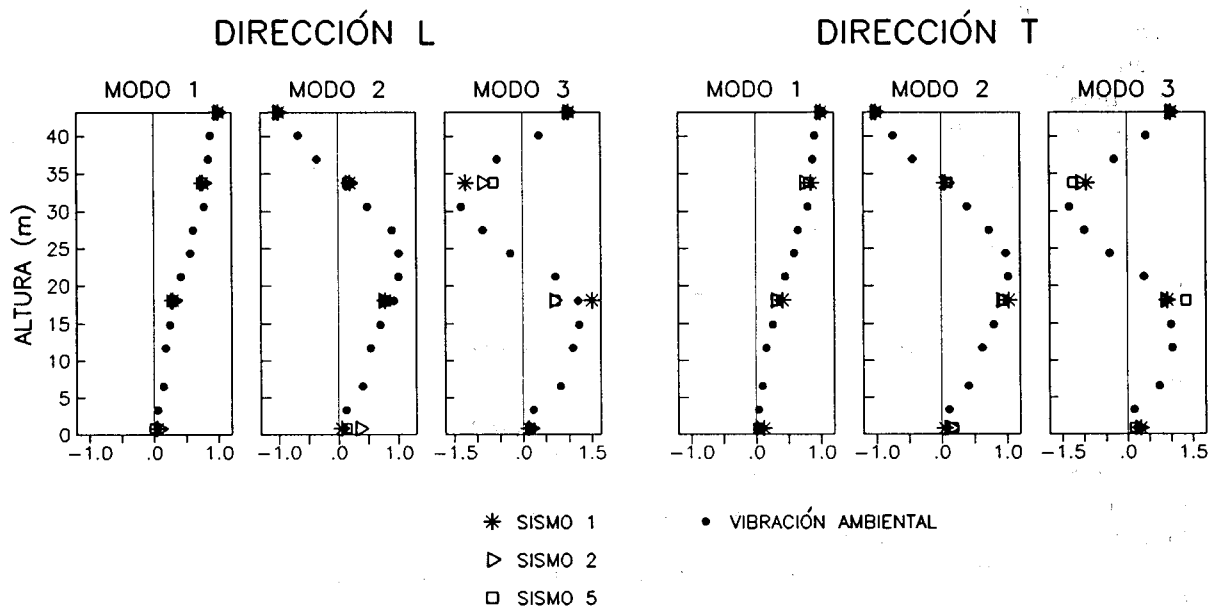


Fig 8. Comparación de las formas modales obtenidas de los registros sísmicos del edificio 49

En general, los resultados obtenidos del análisis de los registros sísmicos de los edificios estudiados concuerdan con los observados en edificios instrumentados en otros países (Anderson *et al*, 1991; Tanaka *et al*, 1969).

RELACIONES PARA ESTIMACIÓN DEL PERIODO DE VIBRAR

Con el fin de estimar las relaciones de los periodos fundamentales de vibración (T) de los edificios y las características estructurales de número de niveles (N), altura total (H) y densidad de muros* (D), se realizaron análisis de regresión para minimizar el error cuadrático de la estimación. Las relaciones utilizadas fueron

$$\begin{aligned}T &= a N \\T &= a H^b \\T &= a H^b D^d\end{aligned}$$

donde a, b y d son coeficientes a evaluar en la regresión. Las variables H y D se escogieron con base en las recomendaciones de Arias y Husid (1962). En algunos reglamentos (ATC-03-06, 1978; *Uniform Building Code*, 1994) proponen expresiones con base en estos parámetros.

Para los análisis de regresión los edificios se agruparon como sigue:

- Grupo I** Edificios de marcos en suelos firmes.
- Grupo II** Edificios de marcos en suelos blandos.
- Grupo III** Edificios de marcos y muros en suelos firmes.
- Grupo IV** Edificios de marcos y muros en suelos blandos.
- Grupo V** Edificios de mampostería en suelos firmes.
- Grupo VI** Edificios de mampostería en suelos blandos.
- Grupo VII** Edificios con daño estructural en suelos blandos.

Para la estimación de los periodos fundamentales de vibración de edificios ha sido común recurrir a la relación de $T = N/10$. Al comparar las relaciones del periodo entre el número de niveles obtenidos con los seis primeros grupos (tabla 3), sólo en dos casos concuerda la relación citada.

En las figs 9 y 10 se muestran las expresiones que se obtuvieron de las regresiones calculadas de los grupos I a IV. Los puntos en las gráficas representan a los valores experimentales. En las figuras aparece el índice de correlación (R^2) obtenido en cada una de las regresiones.

Al analizar las relaciones empíricas obtenidas en suelos firmes se aprecia una dispersión alta de los resultados, de hasta 80 por ciento en valores extremos, con índices de correlación muy parecidos para todas las regresiones y con valores que fluctúan alrededor de 0.80.

Las relaciones empíricas obtenidas en suelos blandos, al compararlas con las correspondientes a suelos firmes muestran cómo la flexibilidad del suelo sobre el cual se desplantan los edificios modifica apreciablemente el periodo de vibrar de una estructura. Los valores extremos difieren de los estimados hasta en un 100 por ciento y los índices de correlación obtenidos en las regresiones son un poco mayores que los obtenidos en suelos firmes, con valores entre 0.80 y 0.92.

Las relaciones obtenidas en el grupo de edificios que presentan daño estructural tienen grandes dispersiones, dado que el nivel de daño y el tipo de estructuración no es el mismo en todos los edificios.

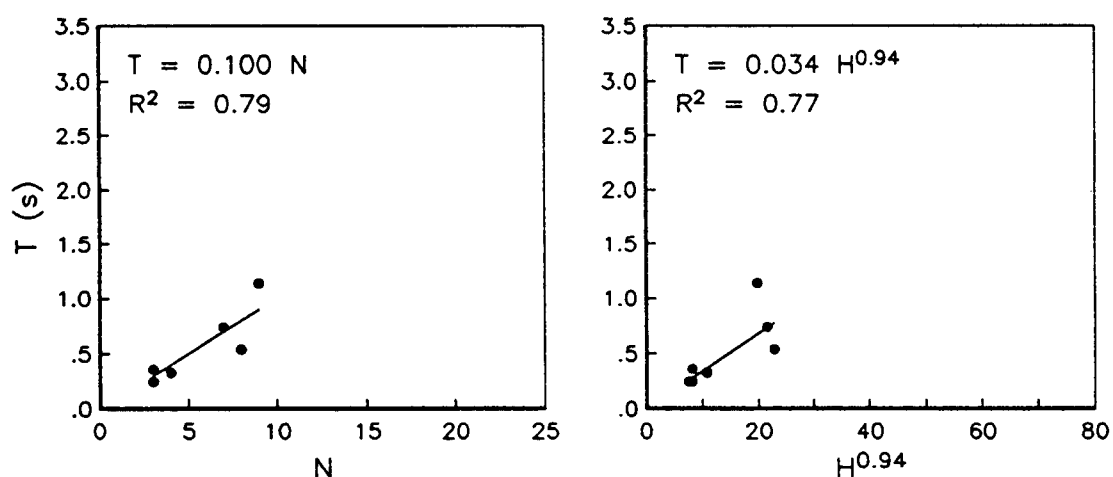
Las estructuras 12 a 15 conforman un edificio (Contreras y Murià Vila, 1993) con un cuerpo común de cinco niveles sobre el cual hay cuatro torres, dos de ellas de 11 niveles construidas en 1982 y las otras dos construidas en 1992. Estas torres no se incluyeron en ningún grupo dadas sus características especiales. Como el sistema estructural de las torres es el mismo pero diseñados con reglamentos diferentes resulta de interés comparar los periodos fundamentales de vibración en función del número de niveles. Con el actual reglamento de construcciones del Distrito Federal se obtienen periodos más cortos y, en este caso, se refleja sobre todo en el periodo de torsión.

* La densidad de muros es un término adimensional igual a la suma de las áreas transversales de los muros en la dirección considerada dividida entre el área de la planta tipo

Tabla 3. Relaciones entre el periodo fundamental de vibración y un número de niveles

GRUPO DE EDIFICIOS	SUELO FIRME	SUELO BLANDO
Marcos	0.100	0.126
Marcos y Muros	0.063	0.102
Mampostería	0.040	0.073

SUELO FIRME



SUELO BLANDO

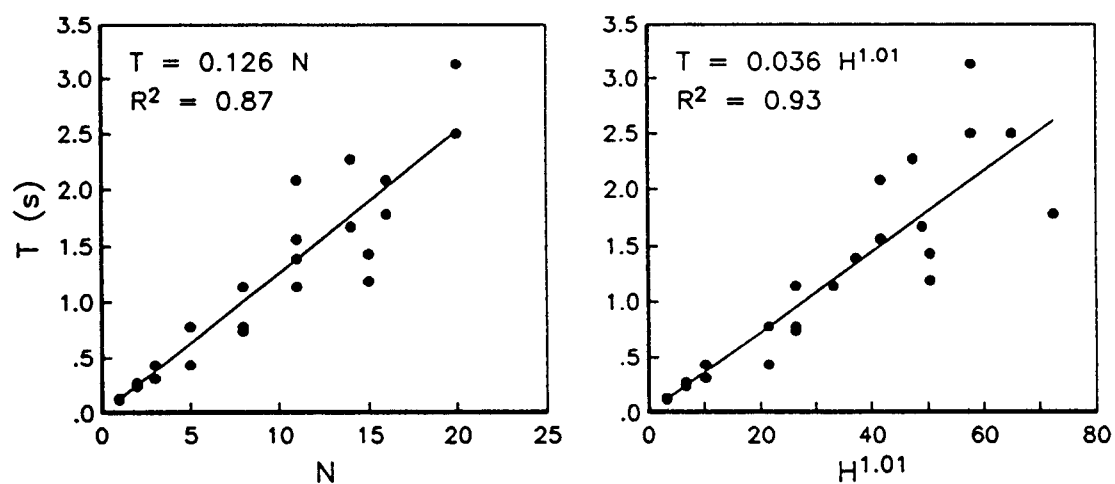


Fig 9. Relaciones empíricas entre el periodo fundamental de vibración y las características estructurales de los edificios de marcos

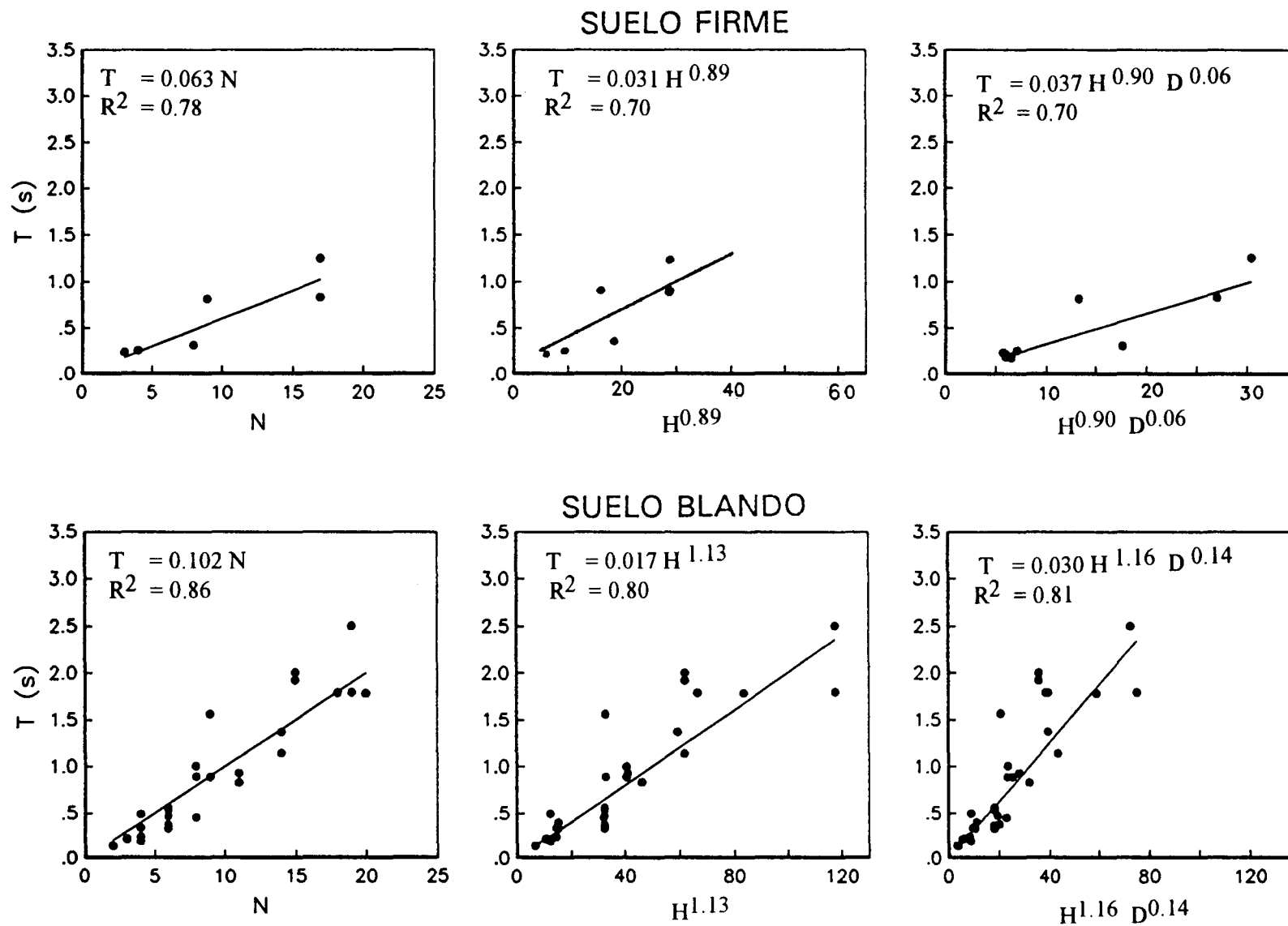


Fig 10. Relaciones empíricas entre el periodo fundamental de vibración y las características estructurales de los edificios de marcos y muros

La estimación de los periodos fundamentales de un edificio con base en las relaciones empíricas calculadas puede conducir diferencias de hasta 100 por ciento respecto de los reales. Resultados similares se obtienen empleando las expresiones propuestas en los reglamentos ATC-3-06 (1978) y *Uniform Building Code* (1994). Otros autores han planteado relaciones que involucran un mayor número de parámetros y las dispersiones que ellos obtienen de sus datos es significativa (Blume y Honda, 1978; Wallace y Moehle, 1992).

MODELOS MATEMÁTICOS CALIBRADOS

La obtención de características dinámicas de edificios reales permite evaluar los modelos teóricos existentes y calibrar modelos para que sean capaces de reproducir la respuesta lineal ante acciones dinámicas. En este trabajo se desarrollaron los modelos de 13 edificios medidos, a fin de comparar las características dinámicas calculadas y experimentales.

Para la modelación matemática de las estructuras se emplearon programas de análisis lineal comerciales con los cuales se puede idealizar la estructura en dos o tres dimensiones. Los modelos tridimensionales se justificaron en los casos en que existieron efectos torsionales significativos o sistemas de piso flexible, de lo contrario los resultados de modelos planos fueron adecuados.

Las consideraciones de análisis para una idealización representativa del comportamiento lineal son:

- La existencia de zonas rígidas en la unión viga-columna.
- La presencia de pretilos y dinteles.
- El acoplamiento de la losa con las vigas.
- Escaleras y rampas de estacionamiento.
- Las propiedades geométricas de los elementos estructurales con materiales compuestos se calculan a partir de secciones transformadas.
- Las concentraciones significativas de carga muerta en una planta deben considerarse en el cálculo de los momentos de inercia de masa.
- Sección agrietada en vigas para edificios en que se observen agrietamientos en trabes y losas.
- Los muros de mampostería que no estén adecuadamente desligados.

- En el caso de estructuras de concreto, los módulos de elasticidad deben establecerse de acuerdo con los niveles de esfuerzos.

- En edificios desplantados en suelos blandos es necesario tomar en cuenta la flexibilidad del suelo. Además, para estructuras muy rígidas hay que considerar la capacidad de disipación de energía del suelo, debido principalmente al amortiguamiento por radiación.

Se estableció la estrategia de analizar las estructuras con base en la información obtenida y juzgar la aproximación de los modelos conforme se incluían en el mismo los diferentes elementos estructurales descritos. En la tabla 4 se comparan los periodos fundamentales calculados con los modelos matemáticos y los identificados experimentalmente, las diferencias entre ellos son inferiores al 17 por ciento. En cuatro de los edificios instrumentados se han elaborado modelos matemáticos que logran reproducir la respuesta sísmica observada durante tres sismos de moderada intensidad (Murià Vila *et al*, 1992; Murià Vila *et al*, 1993; Murià Vila *et al*, 1994; Murià Vila y Meli, 1994).

En los edificios 23 y 41, desplantados en suelo blando y con pilotes de punta, no fue necesario considerar los efectos de interacción suelo-estructura dado que su influencia no es significativa.

COMENTARIOS FINALES

El análisis espectral estadístico de los datos obtenidos de las pruebas de vibración ambiental permitió determinar las frecuencias naturales de vibrar y las correspondientes formas modales de la mayor parte de los edificios. Para ello fue necesario obtener las funciones de transferencia y coherencia, y no limitarse a las densidades espectrales. El régimen forzado a que se ven sometidas las estructuras hace que las crestas máximas de las densidades espectrales no correspondan necesariamente a modos propios de la estructura.

Las pruebas de vibración ambiental en edificios rígidos desplantados en suelos blandos evidenció la dificultad para identificar las frecuencias de vibrar, con la necesidad de recurrir a otros tipos de pruebas experimentales.

Tabla 4. Comparación de los periodos (s) experimentales y calculados de los edificios analizados. Los valores entre paréntesis se obtienen al considerar el efecto de interacción suelo-estructura

EDIFICIO	EXPERIMENTAL			CALCULADO			CALCULADO/EXPERIMENTAL		
	T	L	R	T	L	R	T	L	R
1 +	0.24	0.25	0.16	0.23 ---	0.24 ---	0.18 ---	0.96 ---	0.96 ---	1.13 ---
2	0.25	0.36	0.21	0.25 ---	0.38 ---	0.19 ---	1.00 ---	1.06 ---	0.90 ---
4	0.19	0.18	0.14	0.18 ---	0.19 ---	0.15 ---	0.95 ---	1.06 ---	1.07 ---
7	0.22	0.20	0.14	0.20 ---	0.20 ---	0.15 ---	0.91 ---	1.00 ---	1.07 ---
11	1.25	0.83	0.74	1.23 ---	0.93 ---	---	0.98 ---	1.12 ---	---
21 +	0.34	0.24	0.17	0.10 (0.31)	0.18 (0.23)	0.07 (0.17)	0.29 (0.91)	0.75 (0.90)	0.41 (1.00)
23	0.72	0.43	0.35	0.78 ---	0.50 ---	0.35 ---	1.08 ---	1.16 ---	1.00 ---
40 +	0.89	1.00	0.63	0.87 ---	0.86 ---	0.74 ---	0.98 ---	0.86 ---	1.17 ---
40 + Δ	0.44	0.53	0.28	0.38 (0.41)	0.53 (0.56)	0.26 (0.27)	0.86 (0.93)	1.00 (1.06)	0.93 (0.96)
41	1.14	0.81	0.60	1.18 ---	0.82 ---	0.68 ---	1.04 ---	1.01 ---	1.13 ---
49 + Δ	2.27	1.37	1.25	1.48 (2.18)	0.67 (1.40)	0.75 ---	0.65 (0.96)	0.49 (1.02)	0.60 ---
54	1.92	2.00	1.47	1.15 (1.62)	1.27 (1.68)	1.10 (1.26)	0.60 (0.84)	0.64 (0.84)	0.75 ---
59	2.50	1.78	1.39	1.08 (2.63)	0.72 (1.72)	---	0.43 (1.05)	0.40 (0.97)	---
60	3.13	2.50	1.92	--- (3.34)	--- (2.33)	--- (2.11)	--- (1.07)	--- (0.93)	--- (1.10)

T - TRASVERSAL

L - LONGITUDINAL

R - TORSIÓN

+ - INSTRUMENTADO

Δ - REPARADO O RESTAURADO DESPUÉS DE 1985

Debe hacerse énfasis en que la aplicabilidad de este método queda limitada al comportamiento de estructuras para desplazamientos de pequeña magnitud. A pesar de lo anterior, esta metodología puede proporcionar información valiosa para edificios en donde existan mediciones antes y después de un sismo severo o de una restructuración, para calibrar los modelos matemáticos, así como para analizar la influencia de la interacción suelo-estructura en las propiedades dinámicas de un edificio.

Las variaciones que puedan presentar las frecuencias naturales de vibrar de un edificio en un sismo dependen sensiblemente del tipo de estructuración, por lo que para establecer un criterio entre daño estructural y porcentaje de reducción de las frecuencias de vibración, éste debe hacerse en función de las características estructurales, por tanto es necesario disponer de más información experimental la cual abarque diferentes sistemas estructurales.

Las relaciones para estimar los periodos fundamentales de vibrar son sensibles a las

características de los suelos donde están desplantados, así como las características de las estructuras en cuanto a número de niveles, densidad de muros y altura del edificio.

Los periodos fundamentales de vibración que se han identificado en los edificios medidos de este trabajo son representativos de las estructuras diseñadas con las normas de construcción de 1976, y aunque algunos de ellos han sido reparados con los criterios de las normas de emergencia de 1985, con la cual se ha recuperado e incluso ha aumentado su rigidez y resistencia estructural, estas no alcanzan los niveles que se obtienen con la concepción estructural exigida por las normas de construcción de 1987, sobre todo para estructuras de edificios altos desplantados en suelos blandos. Los reducidos casos estudiados, en suelos firmes, indican cambios significativos.

Los periodos fundamentales de un edificio estimados con las relaciones semi-empíricas tienen grandes dispersiones. Así pues, emplearlas para definir las acciones sísmicas puede

conducir a análisis y diseños estructurales inadecuados. Además, la tendencia actual es establecer en las normas de construcción espectros de diseño de acuerdo con los efectos de sitio y las características estructurales, lo cual exige una mejor estimación de las propiedades dinámicas. Por tanto, las relaciones deben emplearse solamente para tener un indicio del periodo, no para un diseño definitivo, pues existen programas de análisis para establecer modelos representativos de la respuesta dinámica que actualmente están al alcance de prácticamente cualquier despacho de cálculo.

Las correlaciones logradas entre las propiedades dinámicas obtenidas de los modelos matemáticos elásticos y los valores experimentales muestran que se puede lograr una adecuada concordancia, siempre y cuando se consideren todos los elementos estructurales y los llamados no estructurales que contribuyen significativamente en la rigidez y masa de la estructura, así como los efectos de la interacción suelo-estructura en aquellos edificios desplantados en suelos blandos; de lo contrario se pueden presentar diferencias significativas entre dichas características. Esta información ha servido para evaluar las consideraciones de análisis que se deben hacer en la práctica profesional para la idealización matemática de las estructuras.

RECONOCIMIENTO

Se agradece al DDF, CONACYT, CENAPRED, FERRONALES, ANIPPAC y NAFINSA por el apoyo económico brindado, al CIRES, de la Fundación Javier Barros Sierra, por la información proporcionada de los edificios instrumentados, así como a los propietarios de los inmuebles por las facilidades otorgadas. Se hace patente la eficiente labor desempeñada por los grupos de instrumentación encabezados por J.M. Espinosa, R. Peters y R. Quaas, así como a todos los estudiantes que participaron y en especial a S. Moreno, E. Cruz, A. Miranda, A. León, J.H. Pérez, A.M. Toro, V. Gamboa, P. Bolio y E. Carmona. Se agradece a Arturo Tena la revisión del escrito.

REFERENCIAS

- Anderson, J.C., Miranda, E. y Bertero, V.** "Evaluation of the seismic performance of a thirty-story RC building", Report N° UCB/EERC-91/16, University of California at Berkeley, julio 1991
- Arias, A. y Husid, R.** "Fórmula empírica para el cálculo del periodo propio de vibración de edificios de hormigón armado con muros de rigidez", Revista del IDIEM, Vol 1, N° 1, marzo 1962, p 1-11
- ATC-3-06:** Tentative provisions for the development of seismic regulations for building, 1978. Applied Technology Council
- Bendat, J.S. y Piersol, A.G.** "Engineering applications of correlation and spectral analysis", Wiley Interscience, New York, 1980
- Bendat, J.S. y Piersol, A.G.** "Random data: analysis and measurement procedure", Wiley Interscience, New York, 1989
- Blume, J.A. y Honda, K.K.** "Dynamic characteristics of reinforced concrete buildings", ACI, SP 60-5, Symp. on Vibration in Concrete Structures, New Orleans, 1978
- Carydis, P. y Mouzakis, H.P.** "Small amplitude vibration measurements of buildings undamaged, damaged, and repaired after earthquake", Earthquake Spectra, vol 2, n 3, 1986
- Contreras, O. y Murià Vila, D.** "Resultados obtenidos de un sistema de instrumentación sísmica instalado en una estructura", 9th International Seminar on Earthquake Prognostics, San José, Costa Rica, 19-23 de septiembre, 1993
- Del Valle E. y Prince J.** "Analytical and experimental studies of vibration in two buildings", III WCEE, vol 2, Nueva Zelanda 1965, p II 648-II 658

- Foutch, D.A., Hjelmstad, K.D., Del Valle Calderón, E., Figueroa, E. y Downs, R.E.** "The Mexico earthquake of September 19, 1985 - Case studies of seismic strengthening for two buildings in Mexico City", *Earthquake Spectra*, vol 5, n 1, febrero 1989, p 153-176
- González R., Esteva, L., Murià-Vila, D., Noguez, F. y Hernández, L.** "Identificación de parámetros estructurales en edificios instrumentados", Instituto de Ingeniería, UNAM, proyecto 3524, patrocinado DDF, diciembre 1993
- Guzmán, S., Guzmán, I., Murià Vila, D. y Fernández, F.** "Diseño e implementación de un sistema de captura y procesamiento de señales", Instituto de Ingeniería, UNAM, Proy. 0707, octubre 1992
- Kawasumi, H. y Shima, E.** "Some applications of a correlator to engineering problems", III WCEE, vol. 2, Nueva Zelanda, p II-298 a II-320, 1965
- Luco, J.E.** "Soil-structure interaction and identification of structural models", Proc. 2nd ASCE Speciality Conference in Civil Engineering and Nuclear Power, Knoxville, Tennessee, Vol 11, paper N° 10-1, 1980, p 10.1.1-10.1.31
- Murià Vila, D.** "Efectos de interacción suelo-estructura en edificios de mampostería", Simposium Internacional, Seguridad Sísmica en la Vivienda Económica, JICA-CENAPRED, México, 25 al 28 de febrero de 1991
- Murià Vila, D. y González Alcorta, R.** "Propiedades dinámicas del edificio instrumentado con acelerógrafos del Instituto Mexicano del Petróleo" Instituto de Ingeniería, UNAM, proyecto 0718, patrocinado por el CENAPRED, noviembre 1990
- Murià Vila, D., González Alcorta, R., Espinosa Aranda, J.M. y León Romo, A.** "Análisis de la respuesta en un edificio instrumentado", Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, N° 541, agosto 1992
- Murià Vila, D., González Alcorta, R. y Espinosa Aranda, J.M.** "Efectos de interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de un edificio instrumentado", Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, No 555, mayo 1993
- Murià Vila, D., González Alcorta, R., Dyer de León, J.N., Torres, J., Dávila, H. y Ríos, H.** "Respuesta sísmica del edificio Metro Juárez" Instituto de Ingeniería, UNAM, patrocinado por el DDF, proyecto 4515, septiembre 1994
- Murià Vila, D. y Meli, R.** "Respuesta sísmica de un edificio alto instrumentados en la ciudad de México", memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, vol I, p 415-425, Zacatecas, Zac., octubre 29 a noviembre 1 de 1994
- Murià Vila, D. y Moreno Rubín de Celis, S.M.** "Monitoreo de propiedades dinámicas de un edificio de 14 niveles", Patrocinado por CEE y CONACYT, Instituto de Ingeniería, UNAM, Proy 4521, octubre 1994
- Tanaka, T., Yoshizawa, S. y Osawa, Y.** "Period and damping of vibration in actual buildings during earthquakes", Bull. of the Earth. Research Institute, vol 47, 1969, p 1073-1092
- Uniform Building Code 1994, International Conference of Building Officials, Whittier, California, vol 2, 1994
- Wallace, J.W y Moehle, J.P.** "Ductility and detailing requirements of bearing wall buildings", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol 118, n 6, junio 1992.