



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA U.Z.
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Determinación de las propiedades dinámicas y efecto de interacción suelo-estructura de un edificio en la ciudad de México mediante un estudio de vibración ambiental

Tesis para obtener el grado de
Maestro en ciencias en estructuras

PRESENTA
Alexis Domínguez Roblero

DIRECTORES
Dr. David Murià Vila
Dr. Héctor Sánchez Sánchez

México D.F. Mayo 2012

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D. F., siendo las 18:00 horas del día 26 del mes de marzo del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A.-U.Z.

para examinar la tesis titulada:

“DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS Y EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA DE UN EDIFICIO EN LA CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE UN ESTUDIO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL”.

Presentada por el alumno:

Domínguez
Apellido paterno

Roblero
Apellido materno

Alexis
Nombre(s)

Con registro:

A	0	4	0	0	9	1
---	---	---	---	---	---	---

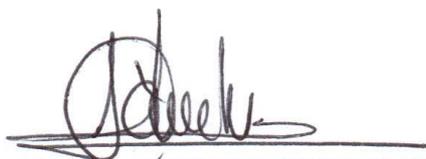
aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN ESTRUCTURAS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis



Dr. Héctor Aureliano Sánchez Sánchez



Dr. David Murià Vila



Dr. Esteban Flores Méndez



Dr. Norberto Domínguez Ramírez



Dr. Ramsés Rodríguez Rocha

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

M. en C. Pino Durán Escamilla



SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

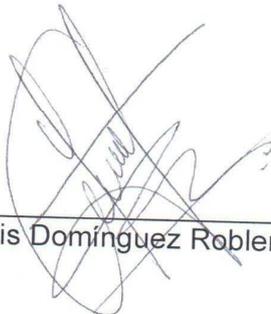
CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México Distrito Federal el día 2 de Mayo del 2012, el que suscribe Alexis Domínguez Roblero alumno del programa de la maestría en ciencias en estructuras con número de registro A040091, adscrito a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura U. Z, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Doctores David Muriá Vila y Héctor Aureliano Sánchez Sánchez y cede los derechos del trabajo intitulado "Determinación de las propiedades dinámicas y efecto de interacción suelo-estructura de un edificio en la ciudad de México mediante un estudio de vibración ambiental", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones electrónicas:

alexito44@hotmail.com
dmv@pumas.ii.unam.mx
brhec@yahoo.com.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Alexis Domínguez Roblero

Resumen

En el presente trabajo se muestra el análisis de las propiedades dinámicas y efectos de interacción suelo-estructura de un edificio alto en la ciudad de México, aplicando un análisis espectral y el método de Luco a partir de registros de vibración ambiental, para lo cual se realizó un programa de pruebas experimentales de vibración. Con el fin de corroborar los resultados obtenidos se realiza una comparación con la información perteneciente al edificio obtenida del análisis de pruebas de vibración y registros sísmicos anteriores.

Abstract

This document presents the analysis of the dynamic properties and soil – structure interaction effects of a tall building in Mexico City applying a spectral analysis and the Luco's method using environmental vibration registries, for which a set of experimental vibration tests were made. In order to corroborate the results, a comparison of the information regarding the building obtained from the test and past registries was made.

Agradecimientos

Un sincero agradecimiento al Dr. David Muria Vila por aceptar dirigir el presente trabajo de tesis, por su disposición, paciencia y todos sus valiosos comentarios que hicieron posible la culminación de este documento.

Al instituto de ingeniería de la UNAM por brindar las facilidades para llevar a cabo el presente trabajo en sus instalaciones, en particular a Gerardo Rodríguez Gutiérrez y José Camargo Pérez a quienes agradezco el haberme facilitado los medios suficientes para la realización del presente trabajo.

Al Dr. Héctor Sánchez Sánchez que siempre mostro su entera disposición como catedrático durante mi etapa como estudiante y como asesor por parte del Instituto Politécnico Nacional para la elaboración de este documento.

Contenido General

	Pag
I. Introducción	2
I.1 Antecedentes	3
I.2 Objetivo	4
I.3 Metas	4
I.4 Justificación	4
II. El edificio y su instrumentación	5
II.1 Descripción de la estructura y del suelo de cimentación	5
II.2 Instrumentación sísmica del edificio	8
II.3 Descripción del suelo de cimentación	9
III. Vibración ambiental	11
III.1 Metodología experimental	11
III.2 Metodología de análisis	12
III.2.1 Análisis espectral de registros de vibración ambiental	12
III.2.2 Metodología para determinar las propiedades dinámicas	15
III.2.2.1 Componente L y T	15
III.2.2.2 Componente de torsión	16
III.3 Metodología para determinar los efectos de interacción suelo-estructura (ISE)	16
III.4 Programa de pruebas experimentales	24
IV. Resultados y Análisis	27
IV.1 Estimación de las propiedades del sistema	27
IV.1.1 Elección de la estación de terreno más representativa	27
IV.1.2 Estimación de las frecuencias de vibrar	28
IV.2 Estimación de los efectos de interacción suelo-estructura	37
IV.2.1 Análisis espectral	37
IV.2.2 Resultados del método simplificado de Luco	39
IV.3 Comparación de resultados	41
IV.3.1 Comparación de frecuencias de vibrar	41
IV.3.2 Comparación de efectos ISE con resultados disponibles	43
Conclusiones y comentarios	46
Referencias	48

Índice de Tablas y Figuras

	pag
<i>II.1 Descripción de la estructura</i>	
Figura II.1.1 - Planta tipo.	6
Figura II.1.2 - Planta del sótano.	7
Figura II.1.3 - Sistema de cimentación.	7
Figura II.1.4 - Esquema de la estructura del edificio.	8
<i>II.2 Instrumentación sísmica del edificio</i>	
Figura II.2.1 - Ubicación de los acelerógrafos.	9
<i>II.3 – Descripción del suelo de cimentación</i>	
Figura II.3.1 - Perfil de velocidades de ondas del sitio PC	10
<i>III.3 Metodología para determinar los efectos de interacción suelo-estructura</i>	
Figura III.3.1 - Idealización del sistema suelo-estructura y grados de libertad en la base	17
Figura III.3.2 - Determinación del cabeceo	19
Figura III.3.3 - Determinación de la rotación	19
<i>III.4 Programa de pruebas experimentales</i>	
Tabla III.4.1 - Programa de pruebas realizadas en el edificio PC.	25
Figura III.4.1 - Puntos instrumentados en el edificio PC	25
Figura III.4.2 - Distribución de los acelerómetros en las pruebas de vibración ambiental	26
<i>IV.1.1 – Elección de la estación de terreno más representativa</i>	
Figura IV.1.1.1 - Densidades espectrales de las estaciones de terreno (JR, SC y ATL) durante las pruebas 1 a 7 (P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7).	27
<i>IV.1.2 – Estimación de las frecuencias de vibrar</i>	
Figura IV.1.2.1 - Funciones de transferencia de los puntos AZC y terrenos (JR y CL) en el componente L de las pruebas 1 y 4 (P1 y P4)	28
Figura IV.1.2.2 - Funciones de transferencia de los puntos AZC y terrenos (JR, CL y ATL) en el componente T de las pruebas 1, 3 y 5 (P1, P3 y P5)	29
Figura IV.1.2.3 - Espectros y funciones de transferencia de las señales azotea centro y sótano centro el componente L de las pruebas 1 y 4 (P1 y P4)	30
Figura IV.1.2.4 - Espectros, funciones de transferencia, coherencia y ángulo de fase del cociente azotea entre nivel intermedio en el componente L de la prueba 1	31
Figura IV.1.2.5 - Espectros y funciones de transferencia de las señales azotea centro y sótano centro en el componente T de las pruebas 1, 3 y 5 (P1, P3 y P5)	32
Figura IV.1.2.6 - Espectros, funciones de transferencia, coherencia y ángulo de fase del cociente azotea entre nivel intermedio en el componente T de la prueba 1	33
Figura IV.1.2.7 - Espectros y función de transferencia de las señales azotea extremo y azotea centro de la prueba 3	34
Figura IV.1.2.8 - Espectros y función de ángulo de fase de las señales AZ-E y AZ-O en dirección T de la prueba 2	34

Figura IV.1.2.9 -	Espectros y función de transferencia de las señales AZ-O y JR en dirección T de la prueba 2	35
Figura IV.1.2.10 -	Espectros y función de transferencia de las señales azotea extremo y sótano centro en dirección T de la prueba 3	35
Figura IV.1.2.11 -	Espectros, funciones de transferencia, coherencia y ángulo de fase del cociente azotea extremo entre nivel intermedio extremo en el componente T de la prueba 2	36
Tabla IV.1.2.1 -	Frecuencias fundamentales en los componentes L, T y torsión (R) obtenidas de la prueba de vibración ambiental	36
 <i>IV.2.1 – Análisis Espectral</i>		
Figura IV.2.1.1 -	Funciones de transferencia entre los puntos de sótano centro (SC) y terrenos (JR, CL y ATL) en los componentes L y T	38
 <i>IV.2.2 Resultados del método simplificado de Luco</i>		
Tabla IV.2.2.1 -	Parámetros para la estimación de los efectos ISE con el método de Luco	39
Tabla IV.2.2.2 -	Parámetros de Luco obtenidos en el componente L y T	40
Tabla IV.2.2.3 -	Rigideces del subsistema de interacción estimadas con el método de Luco	40
 <i>IV.3.1 – Comparación de frecuencias de vibrar</i>		
Tabla IV.3.1.1 -	Valores de frecuencia en Hz indicados para los eventos registrados en el edificio PC	41
 <i>IV.3.2 - Comparación de los efectos de interacción suelo-estructura con resultados disponibles</i>		
Tabla IV.3.2.1 -	Características de los eventos sísmicos registrados en los edificios PC, JAL, SIS y TC	43
Tabla IV.3.2.2 -	Comparación de los parámetros de Luco obtenidos de registros sísmicos y pruebas de vibración ambiental en los componentes L y T	44

I. Introducción

La experiencia de los eventos sísmicos que han perturbado a la sociedad y a las edificaciones que esta habita, hace que los ingenieros se cuestionen sobre la validez de los criterios que utilizan en el diseño y análisis de estructuras. Los daños observados en eventos como el ocurrido en México en 1985 han creado nuevas interrogantes y demandas sobre dichos criterios. Esto hace que día a día se intente ampliar el conocimiento sobre las excitaciones a las que son sometidas las estructuras, su naturaleza y propiedades, y la forma como las estructuras mismas responden a ellas.

Ante este panorama y la demanda permanente a la ingeniería para que garantice la seguridad y estabilidad de las estructuras durante su vida útil, la instrumentación sísmica temporal y permanente de edificios surge como una valiosa herramienta, que estriba su importancia, en que permite hacer evaluaciones cuantitativas de las excitaciones ambientales y sísmicas en las estructuras, y facilita el estudio del comportamiento de las edificaciones antes, durante y después de los eventos sísmicos.

Otro aspecto valioso de la instrumentación, es que la determinación de las características del sistema sirve para la posterior calibración de modelos analíticos, a través de los cuales se pueda reproducir la respuesta dinámica de la estructura real, con lo que se logra emitir recomendaciones que orienten a los ingenieros a mejorar sus modelos analíticos en la práctica profesional.

Un importante tema que ha motivado a la instrumentación de edificios, es el estudio de la relación existente entre la estructura y el suelo en el que se encuentra. Bien sea por la presencia de efectos de sitio debidos a la naturaleza misma del suelo o por los efectos de Interacción Suelo-Estructura (ISE).

I. 1 Antecedentes

La instrumentación sísmica de edificios en México empezó en 1950 cuando se instalaron transductores de velocidad en la torre latinoamericana y con la posterior instalación de algunos acelerógrafos. El resultado de los análisis de los registros obtenidos fue una referencia para establecer los coeficientes sísmicos del reglamento de construcciones del Distrito Federal de aquel entonces. Después de ocurridos los sismos de septiembre de 1985 y los daños causados en los edificios desplantados sobre el suelo arcilloso de la ciudad de México, se evidencio la importancia de conocer el comportamiento estructural y los parámetros de diseño a partir de datos experimentales.

En México desde la aparición de la tecnología para instrumentación sísmica de estructuras, el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) ha promovido su práctica para el estudio de la respuesta de estructuras ante eventos sísmicos (Murià Vila *et al*, 1997), pero fue hasta 1987 cuando se hizo posible comenzar estos estudios. Sin embargo, actualmente en el país no excede de 25 el número de edificios instrumentados; el número exacto se desconoce. Menos de diez de los edificios son atendidos por algún centro de investigación y solo uno de ellos se encuentra fuera de la ciudad de México. Esta cantidad es insuficiente para cubrir los edificios más representativos de las regiones de mayor riesgo sísmico del país. En los casi 20 años de estudio, se han analizado en el Instituto de Ingeniería (II-UNAM) las respuestas sísmicas registradas de siete edificios instrumentados (Murià Vila *et al*, 2007).

En el presente trabajo se estudia uno de los edificios instrumentados en la ciudad de México y que se encuentra a cargo del II-UNAM, este edificio se comenzó a estudiar en 1990, año en el que se instrumentó la estructura, pero con la finalidad de determinar los efectos ISE en 1997 se complemento la instrumentación con dos acelerógrafos más, uno de ellos en el terreno. La red de acelerógrafos del edificio ha mostrado en general muy buen funcionamiento desde el inicio de su operación en 1990, ya que se han obtenido excelentes colecciones de registros sísmicos en los eventos que se han sentido en la ciudad de México (Murià Vila *et al*, 2000).

I.2 Objetivo

Este trabajo tiene como objetivo el estudio de la respuesta dinámica y los efectos ISE de un edificio alto en la ciudad de México en los componentes traslacionales L y T, mediante el análisis de una selección de los registros más significativos que han sido obtenidos mediante un estudio de vibración ambiental.

I.3 Metas

- Identificar las frecuencias de vibración más significativas del edificio con base en pruebas de vibración ambiental.
- Determinar si la estación de terreno en la instrumentación permanente es representativa del terreno del edificio
- Comparar frecuencias de vibración obtenidas con resultados anteriores
- Determinar los efectos ISE mediante un método aproximado
- Comparar los efectos ISE con los obtenidos anteriormente.

I.4 Justificación

En estudios anteriores de los efectos ISE en el edificio, se obtuvieron resultados que indican que en el componente longitudinal (L), los movimientos de traslación de la base tienen una mayor contribución a la respuesta total del sistema que los movimientos de cabeceo. Este comportamiento difiere a lo ocurrido en algunos edificios estudiados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) donde el movimiento de cabeceo presenta mayor contribución a la respuesta total del sistema, es por eso que en el presente trabajo se determinarán los efectos ISE mediante el método de Luco con el fin de confirmar los resultados obtenidos anteriormente y tratar de aclarar el comportamiento de dicho componente a partir de la comparación de resultados.

II. El edificio y su instrumentación

II.1 Descripción de la estructura

El edificio a estudiar en este trabajo está desplantado sobre el suelo blando de la ciudad de México y se identificará como PC y ha sido estudiado desde 1989 (Martínez, 1989; Rodríguez-Cuevas y Quaas, 1990; Alcántara *et al.*, 1991; Rodríguez-Cuevas, 1992; Alcántara *et al.*, 1997; Murià Vila *et al.*, 1997; Alcántara *et al.*, 2001) y en los últimos años se han desarrollado investigaciones enfocadas a la revisión del diseño (Ávila, 2000) y al análisis de la respuesta dinámica del sistema (Murià Vila *et al.*, 2001b; Palacios, 2003; Correa, 2005; Correa y Murià Vila, 2005)

La estructura está conformada por 16 niveles completos (entre estos un mezzanine), dos niveles de área parcial sobre la azotea que funcionan como cuartos de máquinas del sistema de elevadores, un sótano de 54 por 38 m y un sistema de cimentación compuesto por un cajón al que están unidos 266 pilotes de fricción (figuras II.1.1 a II.1.4). Los niveles inferiores (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7 y E8) destinados a estacionamiento, están dispuestos de forma escalonada y se unen entre sí por medio de rampas. Los restantes 11 niveles de oficinas, se agrupan en una torre de 39 por 24 m. La altura total del edificio es de aproximadamente 55 m.

En las figuras II.1.1 a II.1.4, los ejes L, T y V corresponden a las direcciones longitudinal, transversal y vertical del edificio, que en notación convencional a su vez se asocian con los ejes x, y y z, respectivamente.

La estructura del edificio es de concreto reforzado y está conformada por losas planas aligeradas con luces de aproximadamente 8 m que se apoyan directamente en columnas rectangulares, además existen muros de concreto de espesores de 20 y 25 cm. Como puede verse en la figura II.1.4, el edificio presenta un fuerte cambio de rigidez en altura justo en la interfaz entre los niveles de estacionamiento y oficinas.

La cimentación consta de un cajón con contratrabes que se desplanta a 3.3 m de profundidad. Y se apoya sobre 266 pilotes de fricción triangulares de 65 cm. de lado con una longitud promedio de 27 m. Los pilotes son de concreto prefabricado y están conformados por tres tramos unidos con soldadura *in situ*. En la figura II.1.3 puede verse la distribución de los pilotes en arreglos que se concentran en las zonas central y norte de la planta del edificio, donde se concentra la torre de oficinas. Dichos arreglos se conforman por grupos de hasta 3.6 m de profundidad en los que llegan a estar embebidos unos 16 pilotes.

Durante los sismos de 1985 el edificio sufrió algunos daños estructurales moderados, los cuales se presentaron principalmente en las columnas ubicadas en la transición entre los niveles de estacionamiento y la torre de oficinas. Debido a esto, en 1986 la estructura fue reforzada ampliando las secciones de algunas columnas y conexiones losa plana-columna y colocando muros de concreto en toda su altura, varios de los cuales reemplazaron a muros de mampostería existentes.

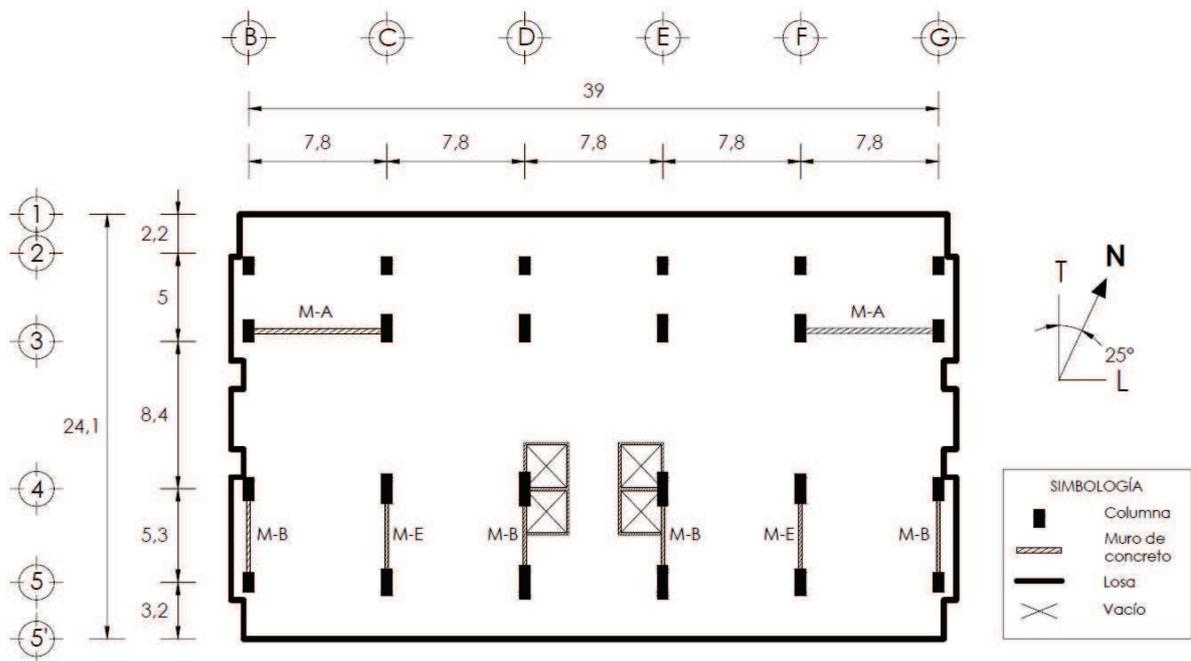


Figura II.1.1 - Planta tipo.

CAPÍTULO II – EL EDIFICIO Y SU INSTRUMENTACIÓN

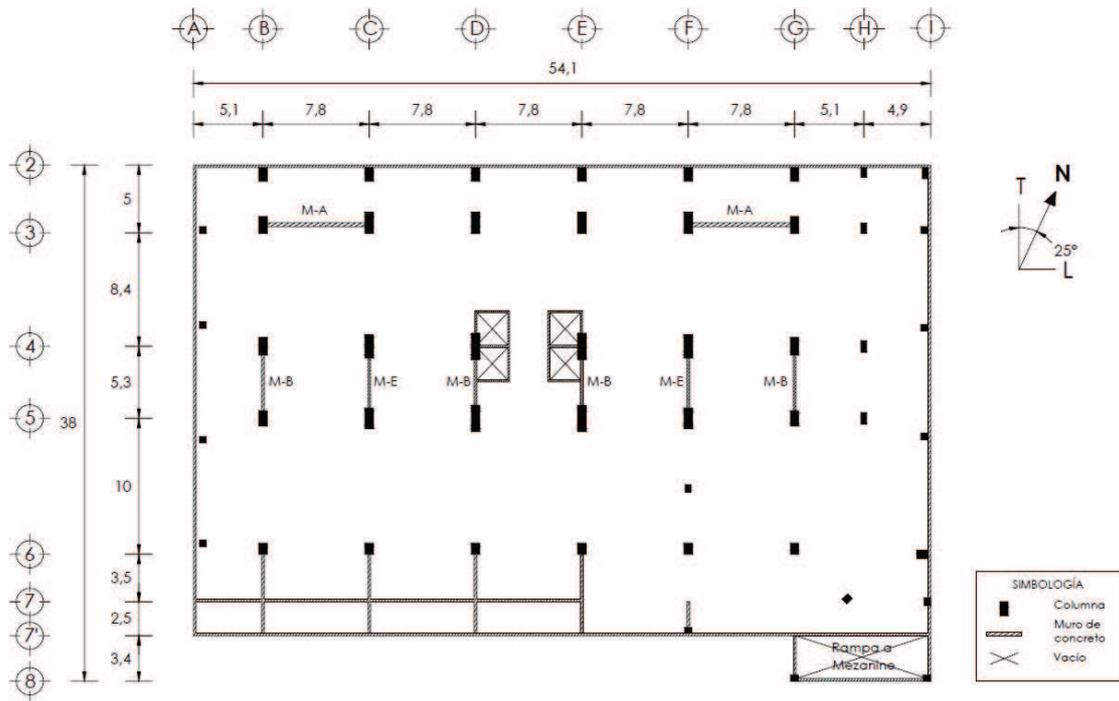


Figura II.1.2 - Planta del sótano.

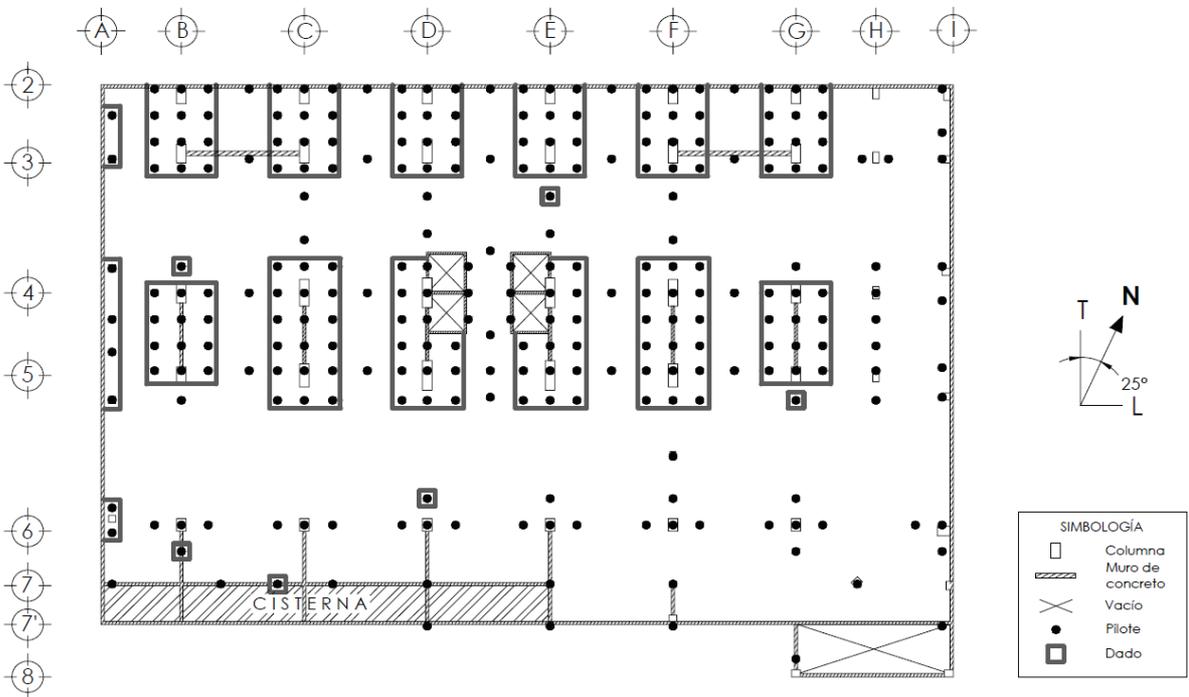


Figura II.1.3 – Sistema de cimentación.

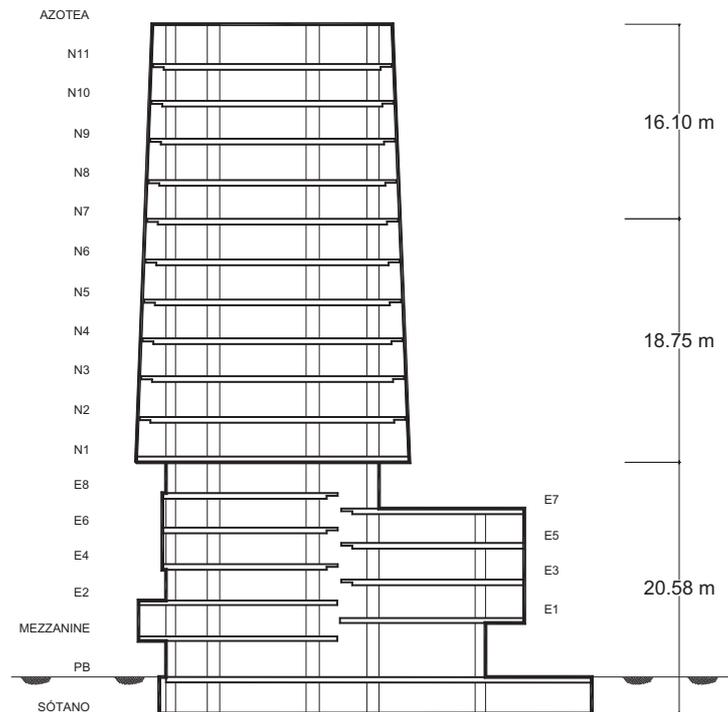


Figura II.1.4 – Esquema de la estructura del edificio.

II.2 Instrumentación sísmica del edificio

En 1990 se instaló en el edificio una red acelerográfica compuesta por 11 acelerógrafos digitales triaxiales distribuidos en la estructura y el sótano (Rodríguez y Quaas, 1990; Alcántara *et al.*, 1991). En 1999 se instalaron dos acelerógrafos más (Alcántara *et al.*, 1997; Murià Vila *et al.*, 2001), uno de ellos en la parte sur del sótano y el otro en el jardín, con fin de estudiar los efectos ISE y su influencia en la respuesta dinámica del edificio.

En la figura II.2.1 se presenta la distribución de los 13 instrumentos instalados en el edificio. Los acelerógrafos ubicados en la estructura son digitales modelo DCA-333R, mientras que el que está localizado en el terreno es un instrumento de pozo modelo IDS-3602 y se encuentra a unos 3 m de profundidad. Todos los instrumentos están conectados entre sí y están sincronizados en el tiempo con una configuración maestro-esclavo, en donde el equipo maestro es el 6C.

Dada esta configuración se tienen conformando una línea vertical al sureste del edificio los instrumentos SE, SS, E7, E8, 6E y AE, así como en el centro se tiene otra línea por los aparatos SC, EC, 6C y AC, además de los aparatos en SO, EO y en el terreno JR.

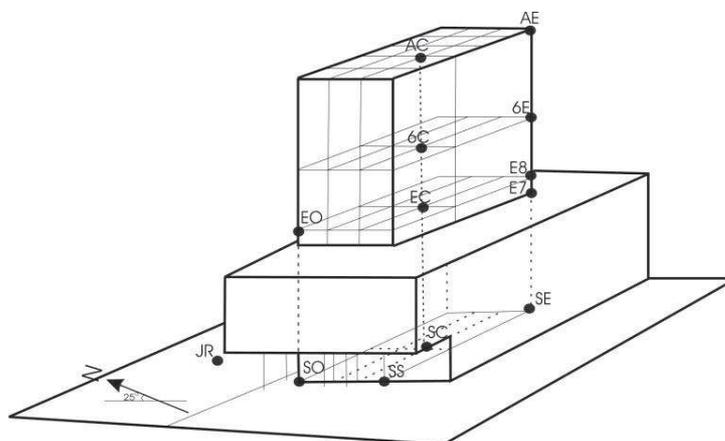


Figura II.2.1 – Ubicación de los acelerógrafos.

II.3 – Descripción del suelo de cimentación

El suelo sobre el cual se apoya el edificio PC pertenece a la zona de depósitos arcillosos de la cuenca de México, específicamente del antiguo lago de Texcoco, clasificada como zona IIIb en las NTCDS-RCDF (2004).

De acuerdo con estudios de mecánica de suelos realizados en la zona de construcción del edificio, así como en zonas cercanas a este (Jaime y Romo, 1987; Ovando y Romo, 1991; Contreras, 1997) y calibrando con resultados de estudios experimentales de registros sísmicos realizados en el sitio (Murià Vila *et al.*, 1997), se construyó el perfil estratigráfico hasta los 40 m (Correa, 2005), profundidad aproximada a la cual se encuentran los depósitos profundos (fig II.3.1).

Del perfil estratigráfico mostrado y mediante la aplicación del método de Gómez (Gómez, 2000) se obtuvo un periodo dominante del sitio de (T_s) 2.2 s, el cual se asocia a una velocidad media de ondas de corte (V_s) de 72 m/s (Correa, 2005). El periodo es consistente con el periodo experimental del suelo obtenido por Murià Vila *et al.* (1997), que se encuentra entre 2.1 y 2.4 s.

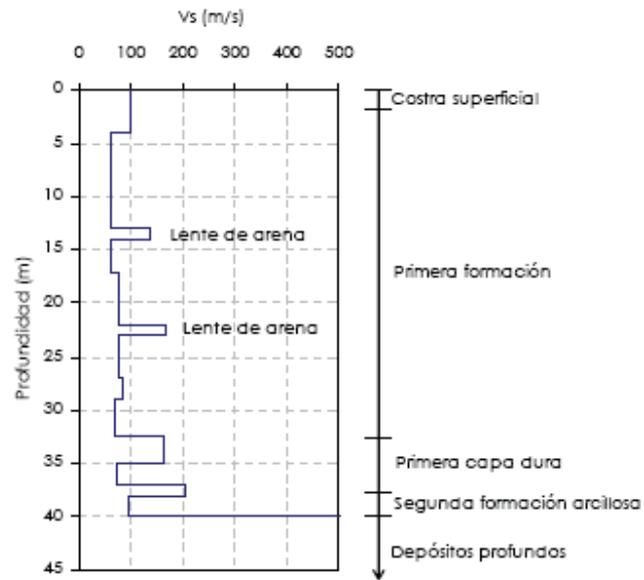


Figura II.3.1 – Perfil de velocidades de ondas del sitio PC

III.- Vibración ambiental

La vibración ambiental registrada en una estructura es generada principalmente por la actividad de las personas que la habitan así como también por el funcionamiento de maquinaria existente en la estructura, al tráfico de vehículos y a otros factores ambientales como el empuje del viento.

El método de vibración ambiental constituye una prueba dinámica eficiente, sencilla y de bajo costo que puede ser efectuada por un pequeño grupo de personas sin alterar el funcionamiento normal del edificio. Los objetivos del análisis de la respuesta dinámica de edificios usando vibración ambiental son de varios tipos. Se puede emplear como control de calidad de obra, ya que los resultados obtenidos en obras recién construidas se pueden comparar con los valores teóricos utilizados en el diseño, de manera que se puede determinar las diferencias entre lo diseñado y lo construido. También los resultados obtenidos permiten tener un punto de comparación para mediciones futuras y efectuar en esta forma, el control de la estructura durante su vida útil, entre otros.

III.1.- Metodología experimental

Para registrar la vibración que se presenta en el edificio, se utiliza un sistema de adquisición de datos que permite capturar simultáneamente las vibraciones en ocho puntos de la estructura. 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 están 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. El tiempo de captura de cada prueba es aproximadamente 15 minutos. Posteriormente, se utilizan técnicas de análisis de señales y programas de cómputo desarrollados en el II-UNAM descritos posteriormente que permiten obtener información a partir de los registros de aceleración de la estructura; con base en estos datos es posible determinar las propiedades dinámicas de la misma, como frecuencias fundamentales de vibración, formas modales y efectos de interacción suelo-estructura (Murià Vila y González R, 1995; Murià Vila 2007).

III.2.- Metodología de análisis

III.2.1 Análisis espectral de registros de vibración ambiental

Una vez que se han obtenido los registros de vibración ambiental se hace necesario su procesamiento mediante un análisis espectral convencional (Bendat y Piersol, 1989; Murià Vila 2007).

Un registro de vibración ambiental consiste en una señal de aceleración que corresponde a un cierto punto en la estructura o el terreno. Si definimos a esta señal de aceleración como $x(t)$, su transformada de Fourier se encuentra dada por la expresión

$$X(f) = \int_0^T x(t)e^{i2\pi ft} dt \quad \text{III.2.1.1}$$

La transformada de Fourier es una función compleja, pues si se aplica la identidad de Euler a la expresión anterior, la ecuación (III.2.1.1) puede escribirse de la siguiente manera.

$$X(f) = \int_0^T x(t) \cos(2\pi ft) dt + i \int_0^T x(t) \sin(2\pi ft) dt \quad \text{III.2.1.2}$$

Una de las formas para expresar una señal $x(t)$, en el dominio de la frecuencia consiste en calcular su función de densidad espectral, también conocida como espectro de potencia, que es una función que representa la distribución de potencia de la señal con respecto a la frecuencia. Esta función se define como

$$S_{xx}(f) = X^*(f) \cdot X(f) \quad \text{III.2.1.3}$$

Donde

$X^*(f)$ Conjugado de la transformada de Fourier de la señal de aceleración

$X(f)$ Transformada de Fourier de la señal de aceleración

La información de las frecuencias negativas y positivas de la función de densidad espectral es la misma, debido a que dicha función es simétrica. Esto hace que sea más conveniente realizar el análisis de un solo lado del espectro, así se tiene:

$$G_{xx}(f) = 2S_{xx}(f) \quad \text{III.2.1.4}$$

Y se define la función $G_{xx}(f)$ como:

$$G_{XX}(f) = \begin{cases} 2S_{XX}(f) & \text{si } f > 0 \\ 2S_{XX}(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad \text{III.2.1.5}$$

Si se tienen dos señales de aceleración correspondientes a dos puntos de la estructura, $x(t)$ y $y(t)$, sus transformadas de Fourier están dadas por

$$X(f) = \int_0^T x(t)e^{-2\pi ft} dt \quad \text{III.2.1.6}$$

$$Y(f) = \int_0^T y(t)e^{-2\pi ft} dt \quad \text{III.2.1.7}$$

Se define el espectro de potencia cruzado entre las dos señales $x(t)$ y $y(t)$, como

$$S_{XY}(f) = X^*(f) \cdot Y(f) \quad \text{III.2.1.8}$$

Y procediendo de igual manera que con el espectro de potencia

$$G_{XY}(f) = 2S_{XY}(f) \quad \text{III.2.1.9}$$

Una vez que se han obtenido los espectros de potencia de cada señal y los espectros cruzados de potencia entre pares de señales de aceleración, se procede a obtener ciertas relaciones entre dichas funciones, que nos permitan estimar, junto con la información de los espectros de potencia y mediante las consideraciones adecuadas, las propiedades dinámicas del sistema. Las relaciones matemáticas adicionales de las cuales haremos uso son la función de transferencia, la función de coherencia y el ángulo de fase. A continuación se presentan las características de cada una de ellas.

Función de Transferencia.

Si se tienen dos señales de aceleración, $x(t)$ y $y(t)$, y sus correspondientes transformadas de Fourier $X(f)$ y $Y(f)$, la función de transferencia entre esas dos señales se define como:

$$FT = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad \text{III.2.1.10}$$

Evidentemente la función de transferencia puede obtenerse a partir de los espectros de potencia de las señales

$$FT = \left| \frac{S_{YY}(f)}{S_{XX}(f)} \right|^{\frac{1}{2}} = \left| \frac{G_{YY}(f)}{G_{XX}(f)} \right|^{\frac{1}{2}} \quad \text{III.2.1.11}$$

La función de transferencia nos sirve para encontrar la relación de amplitudes que tienen dos señales.

Función de Coherencia.

A partir de la siguiente desigualdad que se cumple para toda f ,

$$|S_{YY}(f)|^2 \leq G_{XX}(f)G_{YY}(f) \quad \text{III.2.1.12}$$

Tenemos así mismo que:

$$|S_{XY}(f)|^2 \leq S_{XX}(f)S_{YY}(f) \quad \text{III.2.1.13}$$

Y la función de coherencia se define como

$$\gamma_{XY}^2 = \frac{|S_{XY}(f)|^2}{S_{XX}(f)S_{YY}(f)} = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_{XX}(f)G_{YY}(f)} \quad \text{III.2.1.14}$$

Se tiene entonces que:

$$0 \leq \gamma_{XY}^2 \leq 1 \quad \text{III.2.1.15}$$

La función de coherencia permite estimar en función de la frecuencia, el grado de linealidad entre dos señales de aceleración $x(t)$ y $y(t)$. La escala para medir la linealidad varia de 0 a 1; los efectos de coherencia inferiores a uno puede deberse a: ruido en las señales $x(t)$ y $y(t)$ o que no están correlacionadas; a efectos no lineales; a errores por falta de resolución numérica, o a desfases introducidos por el dispositivo experimental. En cambio, un valor de coherencia de uno significa que la relación entre las señales es completamente lineal.

Ángulo de fase.

El espectro cruzado de potencia entre dos señales de aceleración $x(t)$ y $y(t)$ se definió anteriormente como:

$$G_{XY}(f) = 2S_{XY}(f); S_{XY}(f) = X^*(f)Y(f) \quad \text{III.2.1.16}$$

Ya que el espectro cruzado de potencia es resultado de la multiplicación de dos números complejos, $G_{XY}(f) \in C$ y puede ser expresado en forma polar de la manera siguiente

$$G_{XY}(f) = |G_{XY}(f)| e^{-i\theta_{XY}(f)} \quad \text{III.2.1.17}$$

Donde el valor absoluto y el ángulo de fase están determinados por las relaciones

$$|G_{XY}(f)| = \sqrt{C_{XY}^2 + Q_{XY}^2} \quad \text{Valor Absoluto} \quad \text{III.2.1.18}$$

$$\theta(f) = \tan^{-1} \frac{Q_{XY}(f)}{C_{XY}(f)} \quad \text{Ángulo de fase} \quad 0 \leq \theta(f) \leq 180^\circ \quad \text{III.2.1.19}$$

Siendo:

C_{XY} Parte real de $G_{XY}(f)$

Q_{XY} Parte imaginaria de $G_{XY}(f)$

La fase entre dos señales de aceleración permite saber la polaridad del movimiento entre el par de puntos cuyas señales de aceleración se están analizando espectralmente. Un valor de ángulo de fase en valor absoluto mayor de 90° indica que las dos señales están desfasadas en su movimiento, y un valor absoluto de ángulo de fase menor a 90° nos señala que se encuentra en fase.

El ángulo de fase es particularmente importante en la determinación de las configuraciones modales y estimación de frecuencias de torsión de la estructura.

III.2.2 - Metodología para determinar las propiedades dinámicas

Para llevar a cabo la identificación de frecuencias fundamentales del edificio en los componentes longitudinal (L), transversal (T), y de torsión (R), la metodología para determinar estas propiedades dinámicas involucra el análisis de los autoespectros, funciones de transferencia, ángulos de fase y coherencias a partir de los registros de aceleración que se obtuvieron experimentalmente.

III.2.2.1 – Componentes L y T

Debido a que el análisis de señales se realiza por pares, en forma de cocientes, es necesario seleccionar apropiadamente los registros que se analizarán uno con

respecto del otro y contar con información de las señales en las direcciones ortogonales (L y T) del terreno, sótano, niveles intermedios y azotea.

Para determinar las frecuencias fundamentales del edificio tanto en la dirección L como en T se determinan los espectros de las diferentes señales de los pisos instrumentados y en el terreno, posteriormente se calculan las funciones de transferencia, ángulos de fase y coherencia entre las señales de los pisos instrumentados con respecto a la señal de terreno. En el cociente de azotea/terreno se seleccionan las frecuencias asociadas con las ordenadas máximas, las cuales corresponden a las frecuencias de vibración del sistema en el respectivo componente, a manera de comprobación, si existe información redundante como se puede presentar en pruebas de vibración ambiental, se comparan dichos cocientes. También se comprobará obteniendo el cociente de pisos intermedios/terreno y verificando que los valores de coherencia en la frecuencia identificada del cociente azotea/pisos intermedios sea cercano a uno.

Una vez determinadas las frecuencias, se podrían determinar las formas modales asociadas a cada una de ellas, para esto sería necesario contar con más pisos intermedios instrumentados.

III.2.2.2 – Componente de torsión

Para identificar las frecuencias fundamentales en el componente de torsión, se requieren los registros del centro y de los extremos del edificio. En el caso del edificio PC se utilizaron los puntos de azotea centro, azotea este y azotea oeste. En el cociente “azotea este” entre “azotea centro” se identifican las frecuencias o intervalos de frecuencia que corresponde a las ordenadas máximas de la función de transferencia calculada. Con el propósito de corroborar la identificación, se analizan los puntos opuestos de la azotea (azotea oeste entre azotea este) donde los valores del ángulo de fase en las frecuencias identificadas de torsión deberán ser cercanas a 180° o -180° , mostrando así que los puntos analizados se mueven en fase opuesta, lo que indicará que es una frecuencia de torsión.

III.3 Metodología para determinar los efectos de interacción suelo-estructura

Si se quiere determinar los efectos ISE, se necesita idealizar un sistema cuya respuesta total esté compuesta por movimientos de cuerpo rígido de la cimentación y los movimientos debidos a la flexibilidad de la estructura; el sistema se idealiza según se ilustra en la figura III.3.1a y además de los grados de libertad propios de la estructura se han incorporado cinco grados de libertad adicionales, cabeceo y traslación de la base en los componentes transversales y torsión de la base en el componente rotacional (figura III.3.1b). Se hace esta simplificación al considerar que la cimentación es infinitamente rígida.

En los componentes traslacionales el movimiento total en el nivel “j” es el resultado de la suma de los movimientos en el plano del sistema idealizado. Estos movimientos son: traslación en la base (U_0) cabeceo en el nivel (θh) y el debido a la flexibilidad de la estructura (U_e).

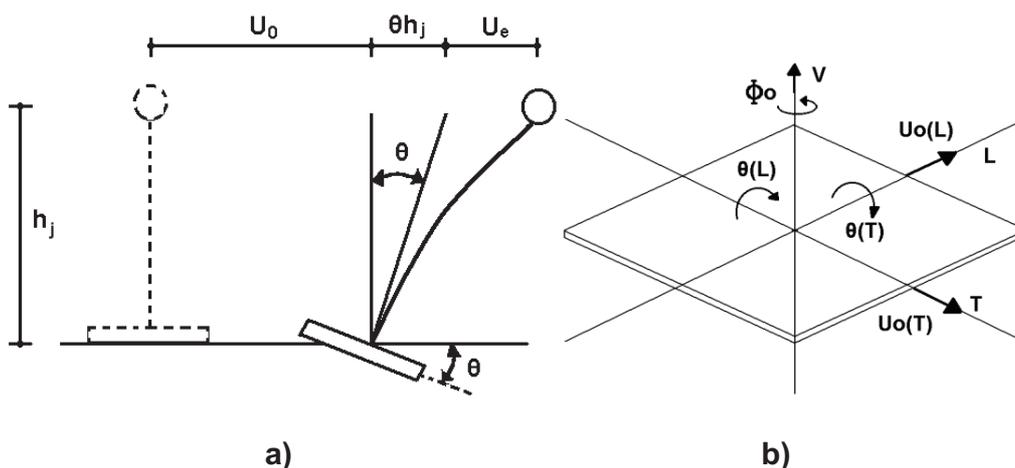


Figura III.3.1 – Idealización del sistema suelo-estructura y grados de libertad en la base

La traslación total en el nivel “j” se puede expresar como

$$U_T^j = U_0 + \theta h_j + U_e^j \quad \text{III.3.1}$$

y si se expresa la traslación del sótano como la suma de la traslación del terreno más la traslación relativa del sótano se tiene

$$U_T^j = U_{terr} + \bar{U}_0 + \theta h_j + U_e^j \quad \text{III.3.2}$$

donde:

- U_T^j traslación total en el nivel j
- U_{terr} traslación del terreno
- \bar{U}_0 traslación relativa de la base con respecto al terreno
- U_0 traslación absoluta de la base
- θh_j cabeceo en el nivel j, igual al giro de la base por la altura del nivel
- U_e^j deformación en el nivel j debida a la flexibilidad del edificio

De manera similar en el componente R, la torsión total de la azotea es la suma de la torsión en la base más la torsión debida a la flexibilidad de la estructura.

$$\Phi_T = \Phi_0 + \Phi_e \quad \text{III.3.3}$$

donde:

Φ_T rotación total

Φ_0 rotación debido a la torsión de la base

Φ_e rotación debido a la flexibilidad del edificio

Con el fin de diferenciar los movimientos rotacionales, se toma como convención llamar giro al movimiento angular de la cimentación alrededor del eje L o T, y rotación al movimiento alrededor del eje V.

De igual manera para este trabajo el cabeceo en el componente L se refiere al giro de la base alrededor del eje T por la altura (h), resultando en un movimiento traslacional en dirección L, así mismo el cabeceo en el componente T se refiere al giro de la base alrededor del eje L por la altura (h) resultando en el movimiento trasnacional en dirección T.

Las ecuaciones III.3.1 a III.3.3 se emplean para generar las señales usadas en la estimación de efectos ISE.

Algunos de los movimientos descritos anteriormente se obtienen con las señales en azotea (U_T), sótano (U_0) y terreno (U_{terr}) en los componentes L y T; de acuerdo a la instrumentación durante la prueba de vibración ambiental.

El giro se puede obtener con los registros verticales en puntos extremos de la base en la dirección de análisis y conocida la distancia entre estos puntos, como se ilustra en la figura III.3.2.

$$\theta = \frac{so\text{extremo}1(V) - so\text{extremo}2(V)}{D} \quad \text{III.3.4}$$

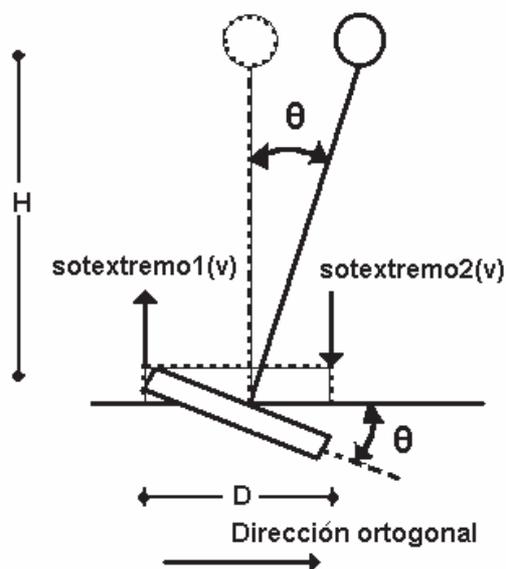


Figura III.3.2 – Determinación del cabeceo

La rotación de la base y la azotea (Φ_T, Φ_0) se puede obtener de la diferencia de los registros de dos puntos opuestos (1 y 2) en cualquiera de las dos direcciones ortogonales del análisis, estas diferencias se dividen entre la distancia entre esos dos puntos, (figura III.3.3)

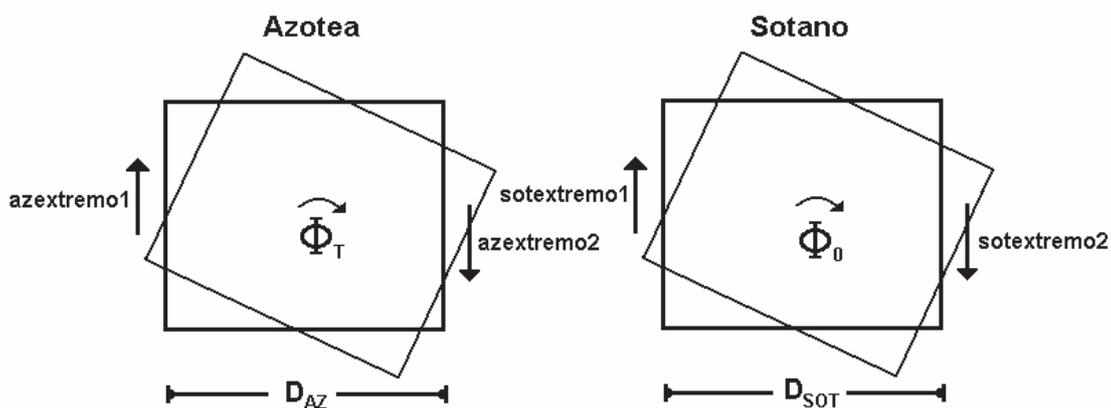


Figura III.3.3 – Determinación de la rotación

Donde los giros serán:

$$\Phi_T = \frac{azextremo1 - azextremo2}{D_{AZ}} \quad \text{III.3.5}$$

$$\Phi_0 = \frac{sotextremo1 - sotextremo2}{D_{SOT}} \quad \text{III.3.6}$$

El cálculo de los giros y las rotaciones se hace en el dominio del tiempo, también se pueden hacer estos cálculos en el dominio de la frecuencia.

Para determinar los efectos ISE en el edificio, se aplica el método simplificado de Luco (Luco, 1980) que se basa en la descomposición modal de las ecuaciones de movimiento del sistema idealizado. En el método de Luco se hace un análisis en el plano en cada uno de los componentes. En este análisis se incluyen los grados de libertad adicionales correspondientes a los movimientos de cuerpo rígido de la cimentación. El método de Luco se emplea con las frecuencias fundamentales del sistema suelo-estructura.

Los resultados de la aplicación de este método en otras estructuras instrumentadas (Luco *et al*, 1987; Mendoza *et al*, 1991; Murià Vila *et al*, 2001a; Murià Vila *et al*, 2004; Murià Vila 2007) muestran su efectividad en la estimación de efectos ISE. Para la aplicación de este método será necesario usar las amplitudes espectrales de las señales y calcular algunos parámetros modales asociados a la estructura con base empotrada.

Frecuencias asociadas a la traslación

Con el método de Luco se puede obtener la frecuencia fundamental de traslación con base empotrada, la de traslación de la base y la de cabeceo de la base, así como las rigideces equivalentes de cada movimiento respectivamente. La frecuencia fundamental de vibrar del modelo de traslación del sistema suelo-estructura está dada por la relación

$$\frac{1}{\tilde{f}} = \frac{1}{f_e^2} + \frac{1}{f_c^2} + \frac{1}{f_{tb}^2} \quad \text{III.3.7}$$

donde:

- \tilde{f} frecuencia fundamental del sistema
- f_e frecuencia de la estructura sin traslación ni giro en la base
- f_c frecuencia natural suponiendo que la base solo puede girar (cabeceo) y con una superestructura infinitamente rígida
- f_{tb} frecuencia natural suponiendo que la base solo puede trasladarse y con una superestructura infinitamente rígida

también se puede escribir la ecuación (III.3.7) en términos del periodo equivalente del sistema

$$\tilde{T}^2 = T_e^2 + T_c^2 + T_{ib}^2 \quad \text{III.3.8}$$

donde:

\tilde{T} periodo fundamental del sistema

T_e periodo de la estructura sin traslación ni giro en la base

T_c periodo natural suponiendo que la base solo puede girar (cabeceo) y con una superestructura infinitamente rígida

T_{ib} periodo natural suponiendo que la base solo puede trasladarse y con una superestructura infinitamente rígida

Se pueden estimar algunas características de la cimentación y la estructura obteniéndose las siguientes relaciones aproximadas válidas en la cercanía de la frecuencia fundamental (Luco, 1980)

$$f_{ib} = \bar{f} \left(\beta_1 \frac{U_0}{U_T} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{III.3.9}$$

$$f_c = \bar{f} \left(\gamma_1 \frac{H\theta}{U_T} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{III.3.10}$$

Sustituyendo las ecuaciones (III.3.9 y III.3.10) en (III.3.7)

$$f_e = \bar{f} \left(1 - \beta_1 \frac{U_0}{U_T} - \gamma_1 \frac{H\theta}{U_T} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{III.3.11}$$

Los parámetros β_1 y γ_1 se obtienen con las masas en cada nivel y la forma modal en los componentes traslacionales de la siguiente manera

$$\beta_1 = \frac{1}{M_1} \{\phi_1\}^T [M] \{1\} \quad \text{III.3.12}$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{HM_1} \{\phi_1\}^T [M] \{h\} \quad \text{III.3.13}$$

donde:

$\{\phi_1\}$ vector de la primera forma modal con base empotrada

$\{M\}$ matriz de masas

M_1 masa modal del primer modo

$\{h\}$ altura de cada nivel con respecto a la base

Las rigideces equivalentes de traslación horizontal K_H y de cabeceo K_R pueden estimarse con las rigideces siguientes

$$K_h = \beta_1^2 M_1 (2\pi f_{tb})^2 \quad \text{III.3.14}$$

$$K_R = \gamma_2^1 H^2 M_1 (2\pi f_c)^2 \quad \text{III.3.15}$$

La contribución de los movimientos de traslación y cabeceo de la base en la respuesta total de traslación de la estructura pueden estimarse aproximadamente con los cocientes U_0/U_T y $H\theta/U_T$ respectivamente, y la suma de estos cocientes representa la contribución total de los efectos ISE en la respuesta de traslación de la estructura.

Frecuencias asociadas a la torsión

De manera similar se obtendrán las frecuencias de torsión de la estructura con base empotrada y torsión de la base (Luco, 1980). Se necesita conocer la frecuencia fundamental de torsión del sistema suelo estructura, la respuesta rotacional en la base y en la azotea, y la masa rotacional de cada nivel en la estructura.

La frecuencia de torsión del sistema suelo-estructura en términos de la frecuencia de torsión de la estructura y de la base se da a través de la relación:

$$\frac{1}{\tilde{f}_t} = \frac{1}{f_t^2} + \frac{1}{f_{rb}^2} \quad \text{III.3.16}$$

donde:

\tilde{f}_t frecuencia fundamental de torsión del sistema

f_t frecuencia de torsión de la estructura sin rotación de la base

f_{rb} frecuencia de torsión suponiendo que su base solo puede girar en su plano y con una superestructura infinitamente rígida

también se puede escribir la ecuación (III.3.16) en términos del periodo fundamental de torsión del sistema.

$$\tilde{T}_t^2 = T_1^2 + T_{rb}^2 \quad \text{III.3.17}$$

donde:

\tilde{T}_t Periodo fundamental de torsión del sistema

T_t Periodo de torsión de la estructura sin rotación de la base

T_{rb} Periodo de torsión suponiendo que su base solo puede girar en su plano y con una superestructura infinitamente rígida

De manera semejante a la traslación se obtienen las siguientes relaciones aproximadas

$$f_{rb} = \tilde{f}_t \left(\beta_1 \frac{\Phi_0}{\Phi_T} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{III.3.18}$$

sustituyendo la ecuación (III.3.18) en la ecuación (III.3.16)

$$f_t = \tilde{f}_t \left(1 - \beta_1 \frac{\Phi_0}{\Phi_T} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{III.3.19}$$

De igual forma que en la ecuación (III.3.12) el parámetro β_1 se obtiene con las masas rotacionales de cada nivel. Se usa la siguiente expresión

$$\beta_1 = \frac{1}{I_{z_1}} \{ \phi_1 \}^T [I_z] \{ 1 \} \quad \text{III.3.20}$$

donde:

$\{ \phi_1 \}$ vector de la primera forma modal con base empotrada

$[I_z]$ matriz de masas rotacionales

I_{z_1} masa modal rotacional del primer modo

La rigidez equivalente de la torsión K_{RV} puede estimarse con la relación:

$$K_{RV} = \beta_1^2 I_{z_1} (2\pi f_{rb})^2 \quad \text{III.3.21}$$

La contribución de la torsión de la base a la respuesta de torsión en la azotea se puede estimar aproximadamente con el cociente Φ_0 / Φ_T .

III.4 Programa de pruebas experimentales

Se instrumentaron quince puntos distribuidos en la azotea, nivel intermedio, sótano y terreno. Se disponen de ocho acelerómetros, por lo que se hicieron siete arreglos diferentes como se muestra en las figuras III.4.1 y III.4.2.

Durante las pruebas se instrumentó el nivel intermedio (E8), ya que este se encuentra ubicado a un tercio de la base, dando así mayor información para la identificación de frecuencias de modos superiores (Murià Vila *et al*, 1995). También se instrumentaron tres puntos de terreno (JR, CL y ATL), donde el punto JR está ubicado sobre la estación de terreno de la instrumentación permanente del edificio, esto con la finalidad de determinar si este punto es representativo del terreno.

En la instrumentación del edificio y terreno, existen puntos que se instrumentan más de una vez a lo largo de las pruebas, esto se hace con la finalidad de comparar la información obtenida durante diferentes pruebas. El programa de pruebas se muestra en la tabla III.4.1.

Para determinar las frecuencias fundamentales del sistema y de la estructura en el componente (L) se analizó la información obtenida de las pruebas 1 y 4, y para el componente (T) se utilizó la información de las pruebas 1, 2, 3 y 5, y para determinar las frecuencias de torsión se analizaron los registros de las pruebas 2 y 3.

El cabeceo de la base se determinó con las pruebas 4 y 5 en los componentes L y T respectivamente. En todas las pruebas esta instrumentado el terreno, información con la cual se determinará si la estación de terreno en la instrumentación permanente es representativa.

Tabla III.4.1 - Programa de pruebas realizadas en el edificio PC.

Prueba	Punto	Componente	Prueba	Punto	Componente	Prueba	Punto	Componente
1	AZC	L	2	AZ-O	T	3	AZC	T
	AZC	T		AZ-E	T		AZ-S	T
	E8	L		E8-O	T		SC	T
	E8	T		E8-E	T		CL	T
	SC	L		S-O	T		S-N	T
	SC	T		S-E	T		S-S	T
	JR	L		JR	T		ATL	T
	JR	T		JR	L		JR	T
4	AZC	L	5	AZC	T	6	ATL	L
	CL	L		CL	T		CL	L
	SC	L		SC	T		SC	L
	CL	V		CL	V		CL	V
	S-N	V		S-O	V		ATL	V
	S-S	V		S-E	V		SC	V
	JR	L		JR	T		JR	L
	JR	V		JR	V		JR	V
7	ATL	L						
	CL	L						
	SC	L						
	CL	T						
	ATL	T						
	SC	T						
	JR	L						
	JR	T						

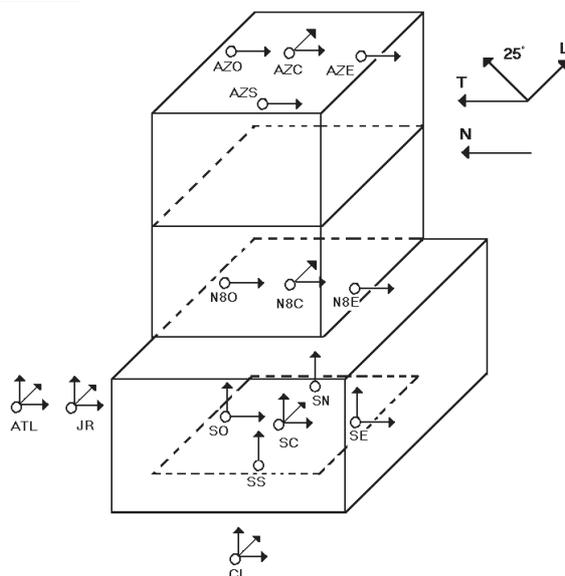


Figura III.4.1 – Puntos instrumentados en el edificio PC

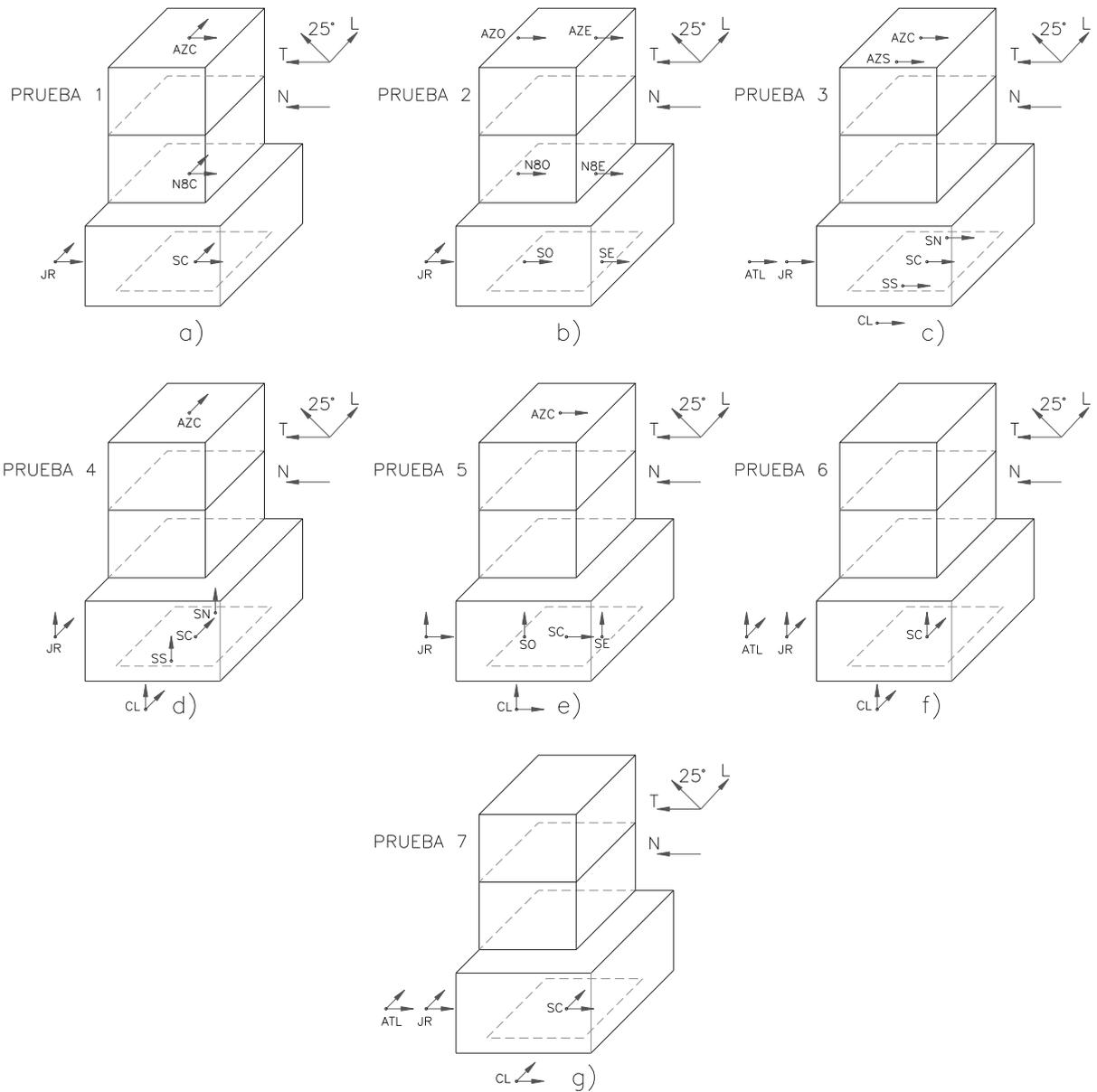


Figura III.4.2 - Distribución de los acelerómetros en las pruebas de vibración ambiental

IV. Resultados y Análisis

IV.1 – Estimación de las propiedades del sistema

IV.1.1 – Elección de la estación de terreno más representativa

De la instrumentación de los tres puntos del terreno a lo largo de la prueba de vibración ambiental, se obtuvieron los espectros de potencia de la figura IV.1.1.1

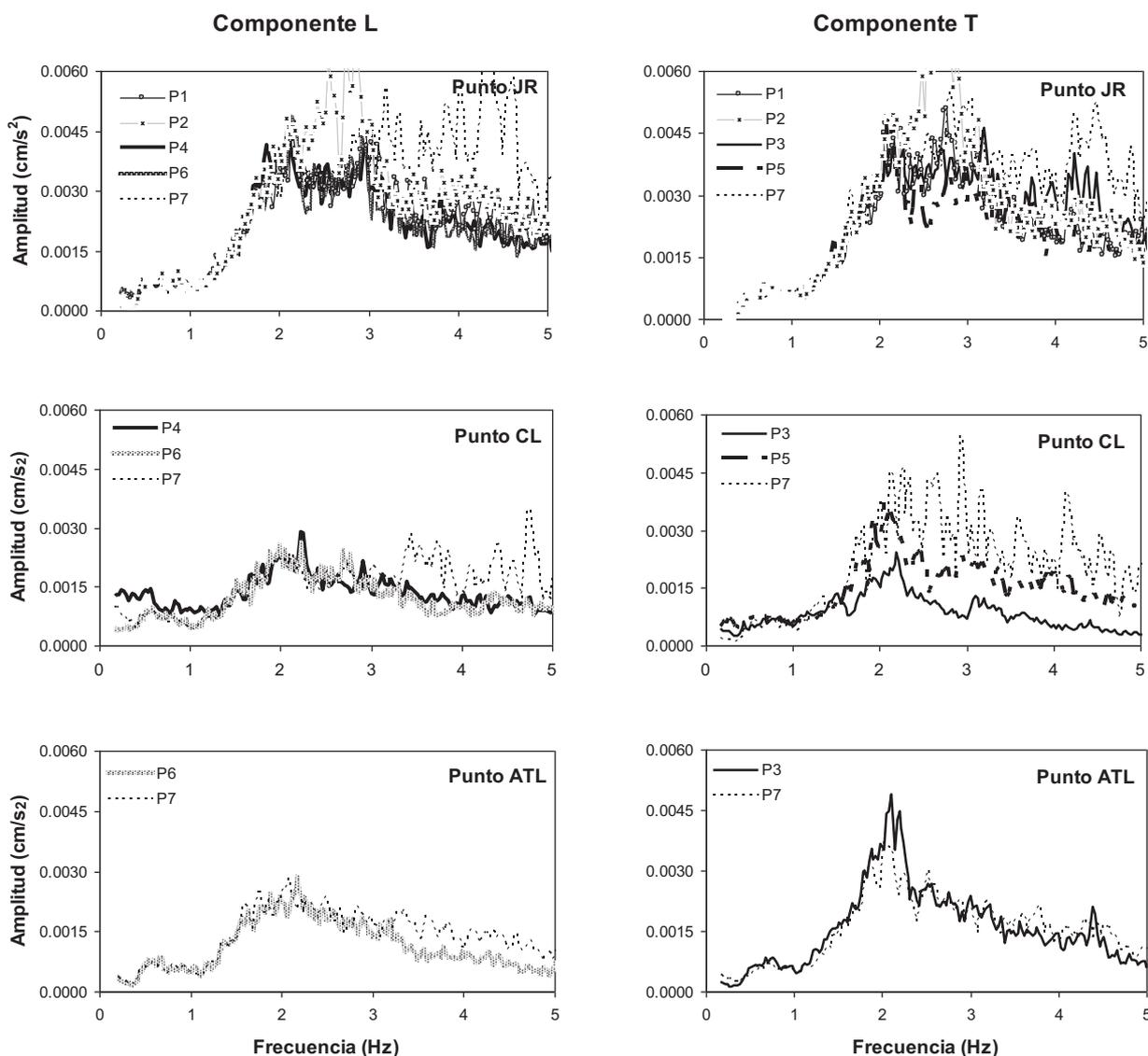


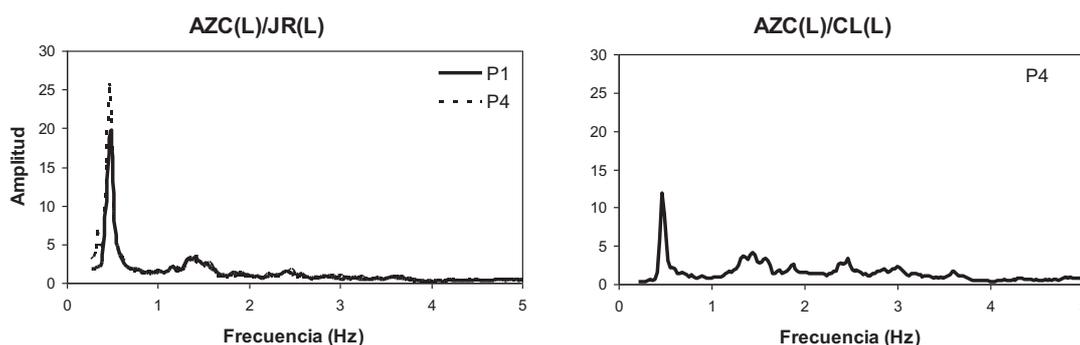
Figura IV.1.1.1 – Densidades espectrales de las estaciones de terreno (JR, SC y ATL) durante las pruebas 1 a 7 (P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7).

En la figura IV.1.1.1 se aprecia que la mayoría de los espectros de potencia de ambos componentes muestran similitud en cuanto a amplitudes para frecuencias menores a 1.8 Hz, excepto en la estación de terreno CL del componente L en la prueba 4, hecho que se considera anómalo debido a que es el único espectro que muestra mayores amplitudes en bajas frecuencias. Para frecuencias mayores a 1.8 Hz (0.55 seg), la diferencia en amplitudes es mayor, esto debido a que las intensidades de vibración cambian a lo largo de las pruebas y a que la vibración producida por el tránsito vehicular se refleja en frecuencias de 1.5 a 5 Hz (0.66 a 0.2 seg), pero ya que en el presente trabajo se emplean las frecuencias de vibrar del edificio que se encuentran en bajas frecuencias, estas diferencias no representan un inconveniente.

Cabe mencionar que la estación de terreno JR se encuentra ubicada sobre la estación de terreno de la instrumentación permanente, por lo que se puede decir que en este punto del terreno se obtiene información que es representativa del terreno circundante del edificio.

IV.1.2 – Estimación de las frecuencias de vibrar

Aplicando la metodología descrita anteriormente y con el uso de macros para hojas de cálculo (Cruz *et al*, 2006), se analizaron las funciones de transferencia de azotea entre terreno para los componentes L y T que se muestran en las figuras IV.1.2.1 y IV.1.2.2 respectivamente, buscando las amplitudes máximas, ya que estas corresponderán muy probablemente a las frecuencias del sistema.



IV.1.2.1 – Funciones de transferencia de los puntos AZC y terrenos (JR y CL) en el componente L de las pruebas 1 y 4 (P1 y P4)

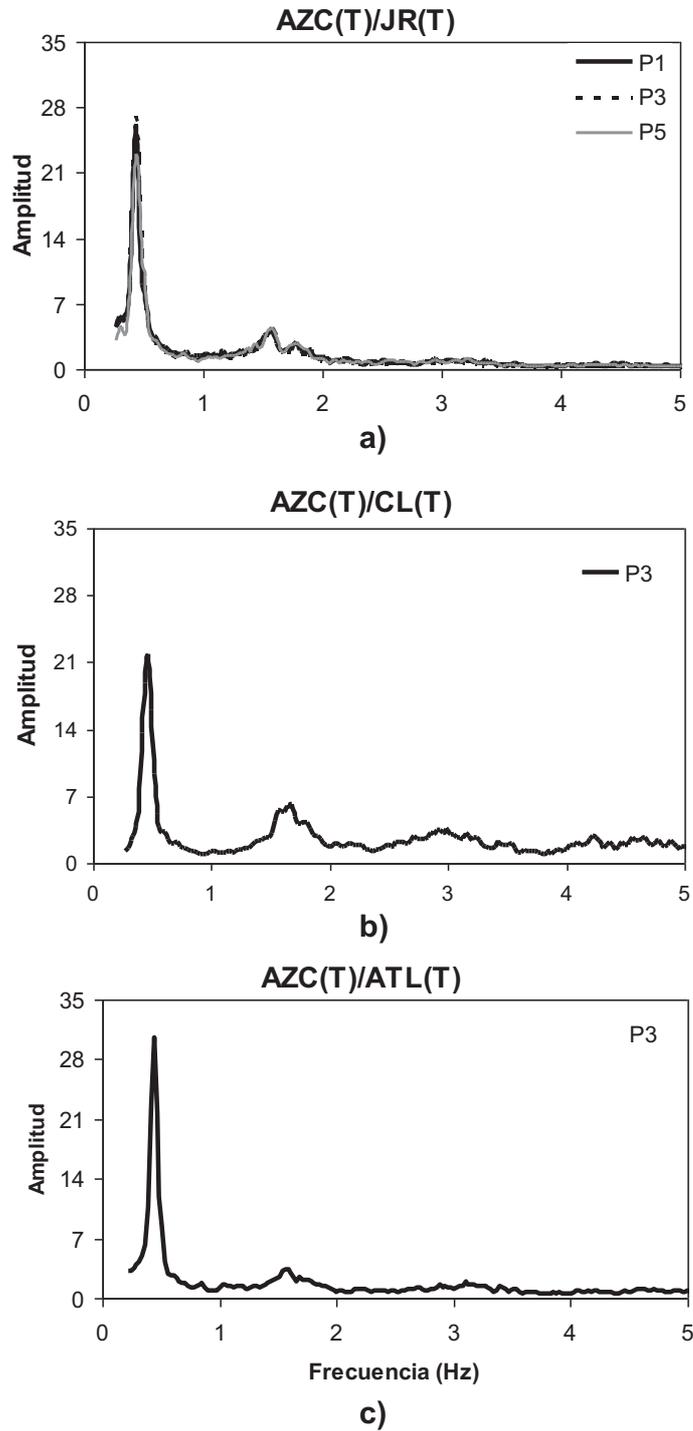


Figura IV.1.2.2 – Funciones de transferencia de los puntos AZC y terrenos (JR, CL y ATL) en el componente T de las pruebas 1, 3 y 5 (P1, P3 y P5)

En la figura IV.1.2.1 se aprecia una diferencia en amplitudes de las funciones de transferencia AZC(L)/JR(L) y AZC(L)/CL(L) donde la amplitud de este último representa el 53% de la amplitud media del primer cociente, esto se debe a que el espectro de potencia de la estación de terreno CL(L) de la prueba 4 (figura IV.1.1.1) muestra variación de amplitudes a bajas frecuencias debido a mala calidad de señal durante la prueba, por lo que la amplitud de la función de transferencia no es confiable, aunque en frecuencia las dos gráficas muestran congruencia.

Con la finalidad de corroborar estos intervalos de frecuencia, se analizan las gráficas de las figuras IV.1.2.3 y IV.1.2.4 que muestra los cocientes de azotea entre sótano y pisos intermedios en dirección L, así como los de las figuras IV.1.2.5 y IV.1.2.6 para la dirección T, donde se verificó que las frecuencias o intervalos de frecuencias coincidieran analizando las funciones de transferencia de azotea y sótano, y verificando que para las frecuencias elegidas se tuvieran valores altos de coherencia entre los puntos de azotea y niveles intermedios.

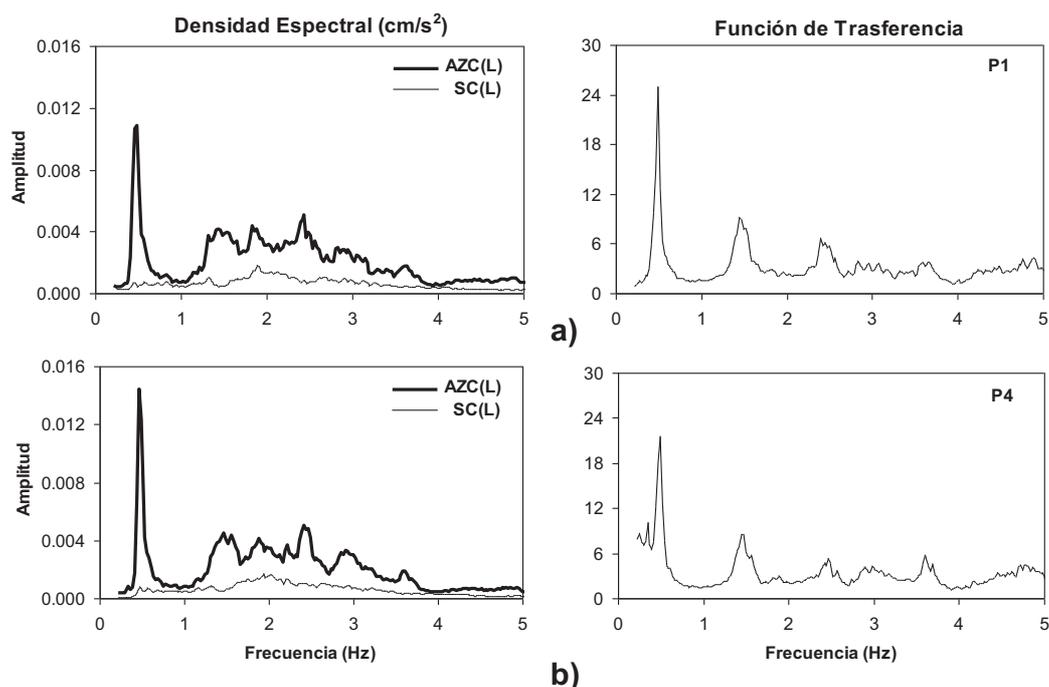


Figura IV.1.2.3 – Espectros y funciones de transferencia de las señales azotea centro y sótano centro el componente L de las pruebas 1 y 4 (P1 y P4)

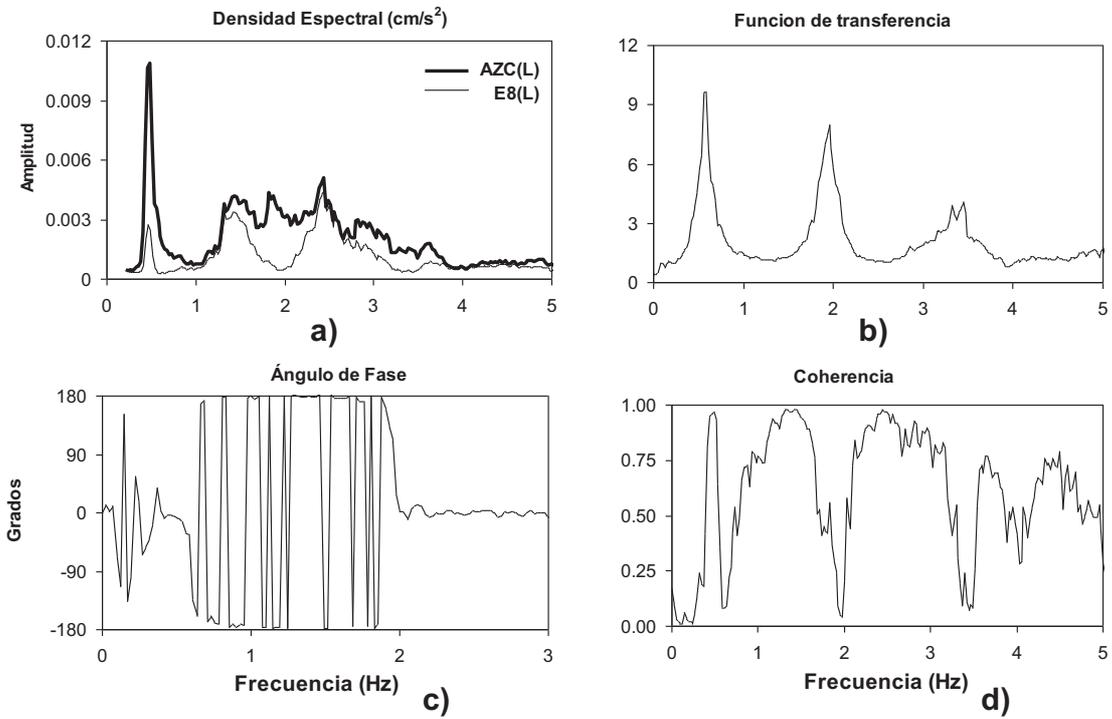


Figura IV.1.2.4 – Espectros, funciones de transferencia, coherencia y ángulo de fase del cociente azotea entre nivel intermedio en el componente L de la prueba 1

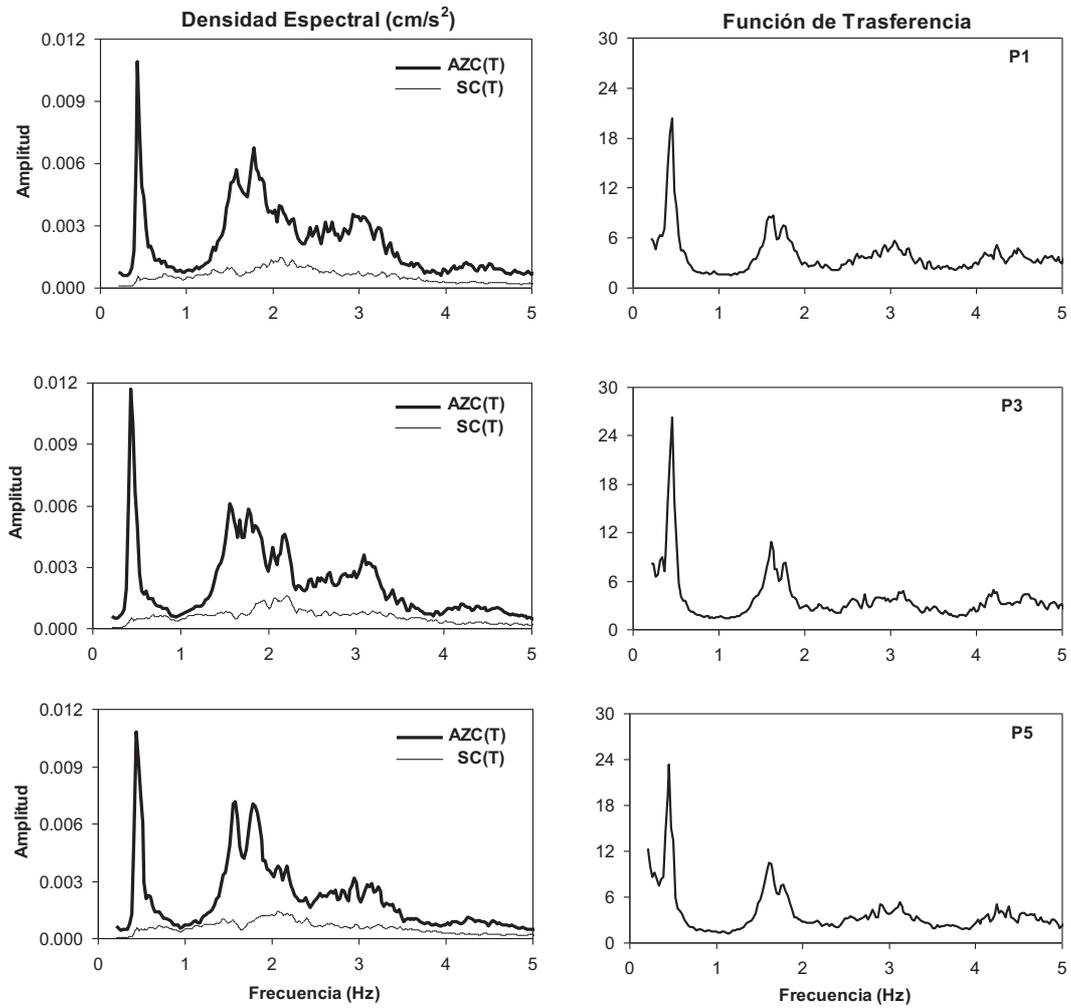


Figura IV.1.2.5 – Espectros y funciones de transferencia de las señales azotea centro y sótano centro en el componente T de las pruebas 1, 3 y 5 (P1, P3 y P5)

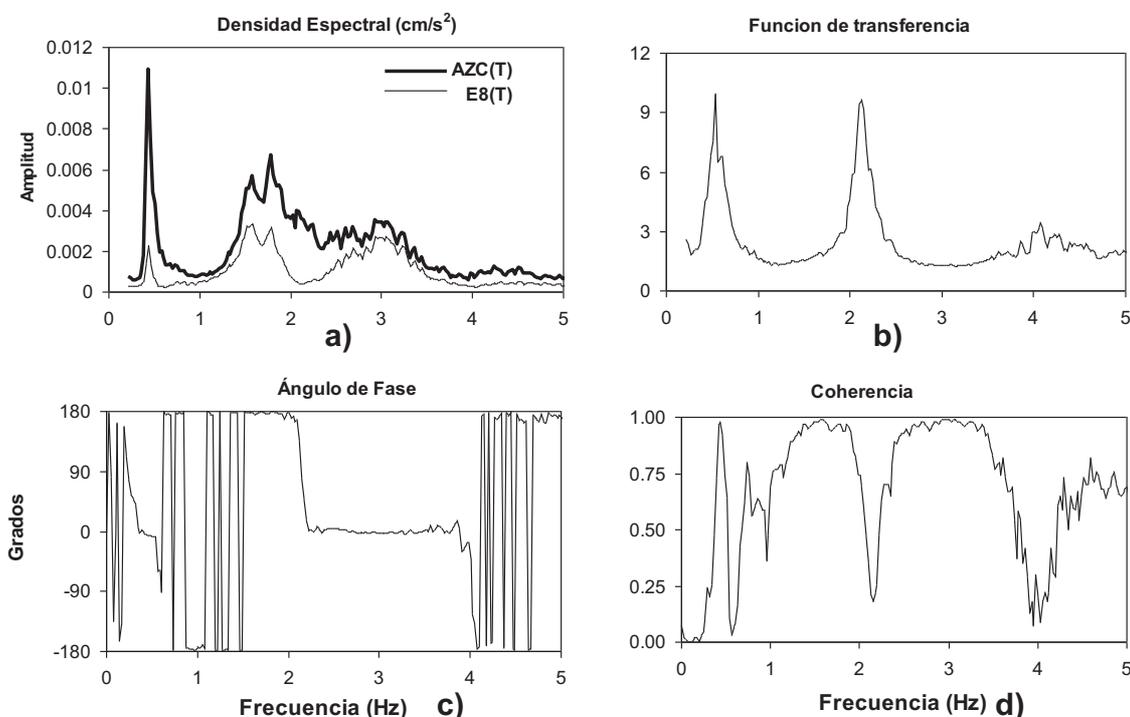


Figura IV.1.2.6 – Espectros, funciones de transferencia, coherencia y ángulo de fase del cociente azotea entre nivel intermedio en el componente T de la prueba 1

Para la determinación de las frecuencias naturales de torsión, se analizaron las señales entre el extremo de la azotea y el centro de la misma, por lo que se utilizó el cociente (AZ-S/AZC) en el componente T (Figura IV.1.2.7) asociando la frecuencia de torsión a la ordenada máxima de la función de transferencia, para complementar la identificación se analizó el ángulo de fase de los extremos de la azotea (AZO/AZE) (Figura IV.1.2.8) donde para la frecuencia identificada el valor de dicha función sería cercano a uno. Otra forma de corroborar esta información es analizando las funciones de transferencia de los cocientes azotea extremo entre terreno (AZO/JR) (figura IV.1.2.9) y azotea extremo entre sótano centro (AZO/SC) (figura IV.1.2.10), donde por lo menos se puede identificar la frecuencia fundamental de torsión.

Los resultados de la identificación de frecuencia se muestran en la tabla IV.1.2.1

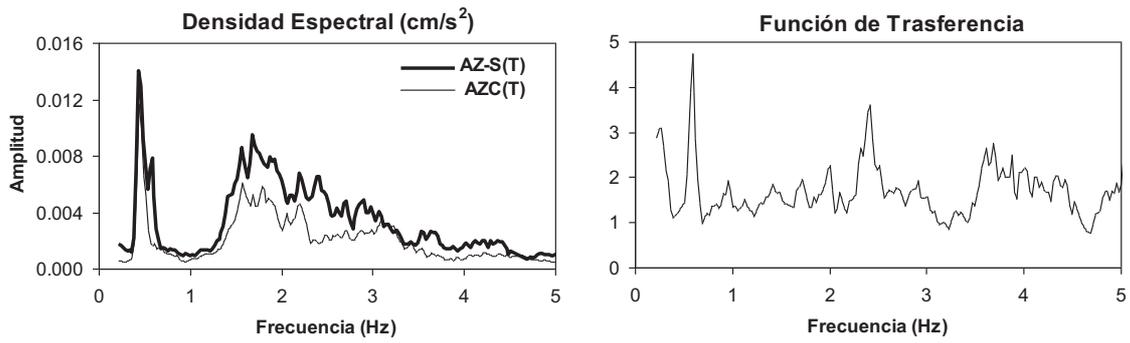


Figura IV.1.2.7 – Espectros y función de transferencia de las señales azotea extremo y azotea centro de la prueba 3

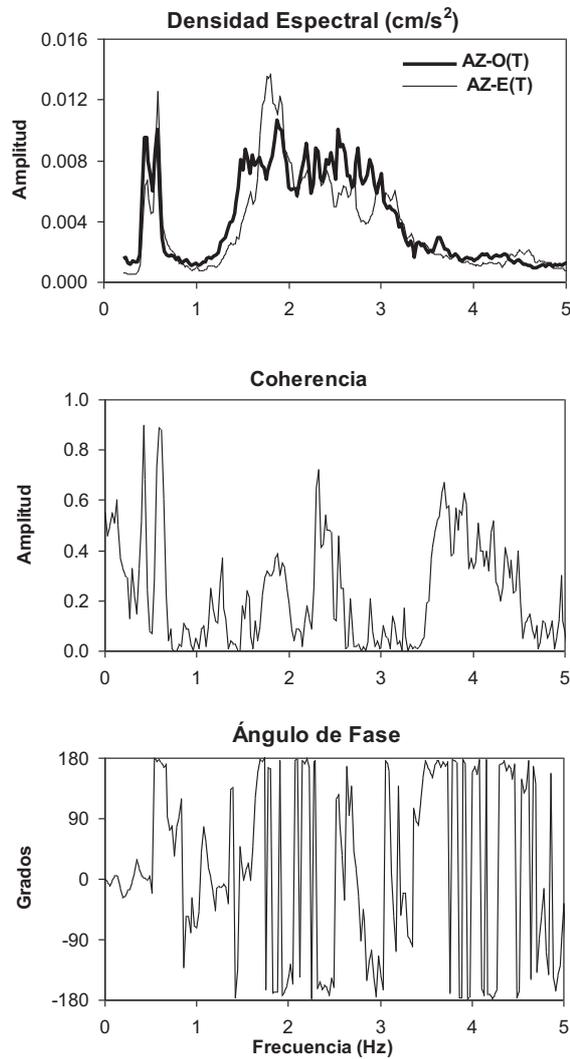


Figura IV.1.2.8 – Espectros y función de ángulo de fase de las señales AZ-E y AZ-O en dirección T de la prueba 2

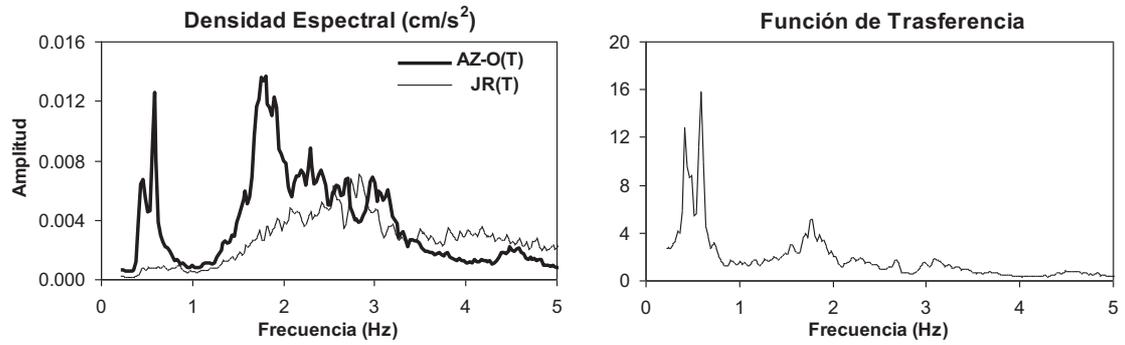


Figura IV.1.2.9 – Espectros y función de transferencia de las señales AZ-O y JR en dirección T de la prueba 2

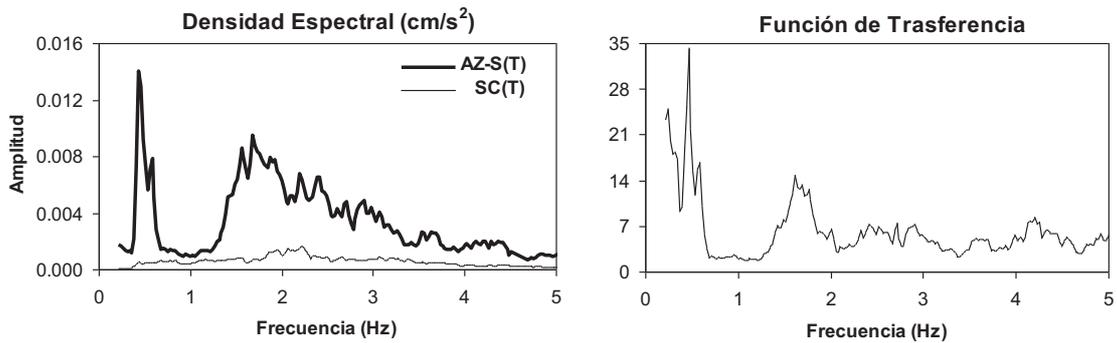


Figura IV.1.2.10 – Espectros y función de transferencia de las señales azotea extremo y sótano centro en dirección T de la prueba 3

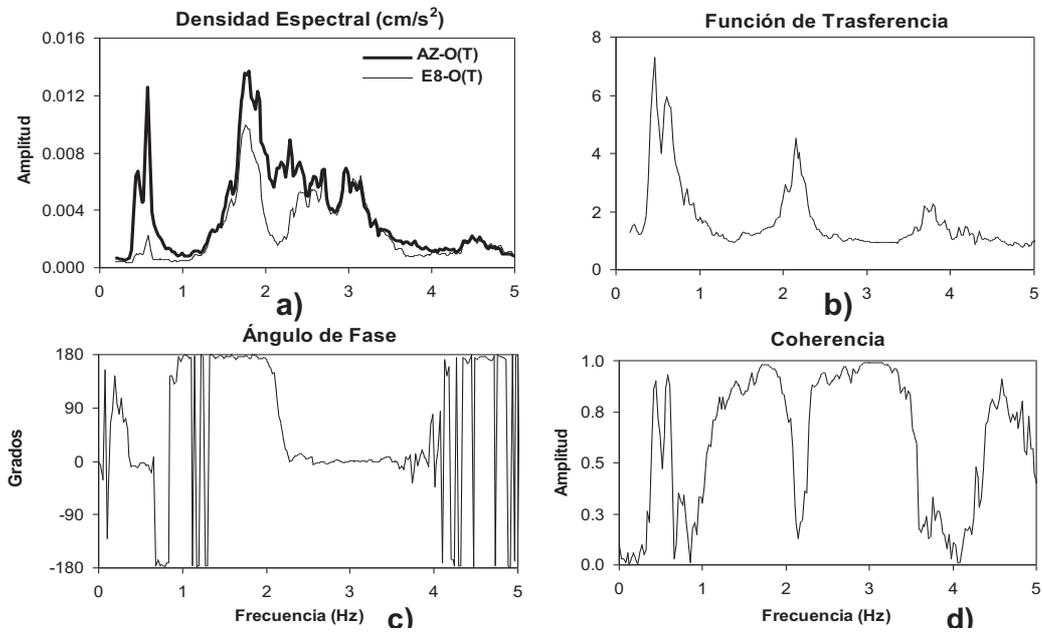


Figura IV.1.2.11 – Espectros, funciones de transferencia, coherencia y ángulo de fase del cociente azotea extremo entre nivel intermedio extremo en el componente T de la prueba 2

Tabla IV.1.2.1 – Frecuencias fundamentales en los componentes L, T y torsión (R) obtenidas de la prueba de vibración ambiental

Evento	Frecuencias (Hz)		
	L	T	R
1	0.46 - 0.49	0.44	0.59
2	1.39 - 1.56	1.56 - 1.59	1.76 - 1.78
3	2.44 - 2.56	2.95 - 3.13	3.05 - 3.70*

* La frecuencia más probable se encuentra en 3.10 Hz (0.32 seg)

IV.2 – Estimación de los efectos de interacción Suelo-Estructura

IV.2.1 – Análisis Espectral

Para determinar de manera aproximada la presencia de los efectos ISE podemos calcular los cocientes espectrales de los registros obtenidos en el sótano del edificio y la estación de terreno. Esta función de transferencia permite observar el movimiento de la base de la cimentación con respecto al ocurrido en el terreno.

En la figura IV.2.1.1 se muestran los cocientes que relacionan el sótano y terreno, donde se aprecia que la mayoría de las amplitudes de los espectros oscilan alrededor de uno entre 0.37 y 1.5 Hz (2.7 y 0.6 seg), y después de este valor se aprecia un abatimiento de la amplitud, este comportamiento se debe a la influencia de la interacción cinemática entre el suelo y la estructura. Este tipo de interacción se refleja en frecuencias altas, ya que la cimentación filtra las ondas de baja longitud (alta frecuencia), mientras que las ondas que cuya longitud supera la dimensión de la cimentación (bajas frecuencias) logran superar el filtro que representa la cimentación misma.

En el cociente SC/CL en el componente L se presentan diferencias originadas por las irregularidades de la prueba 4 mencionadas anteriormente.

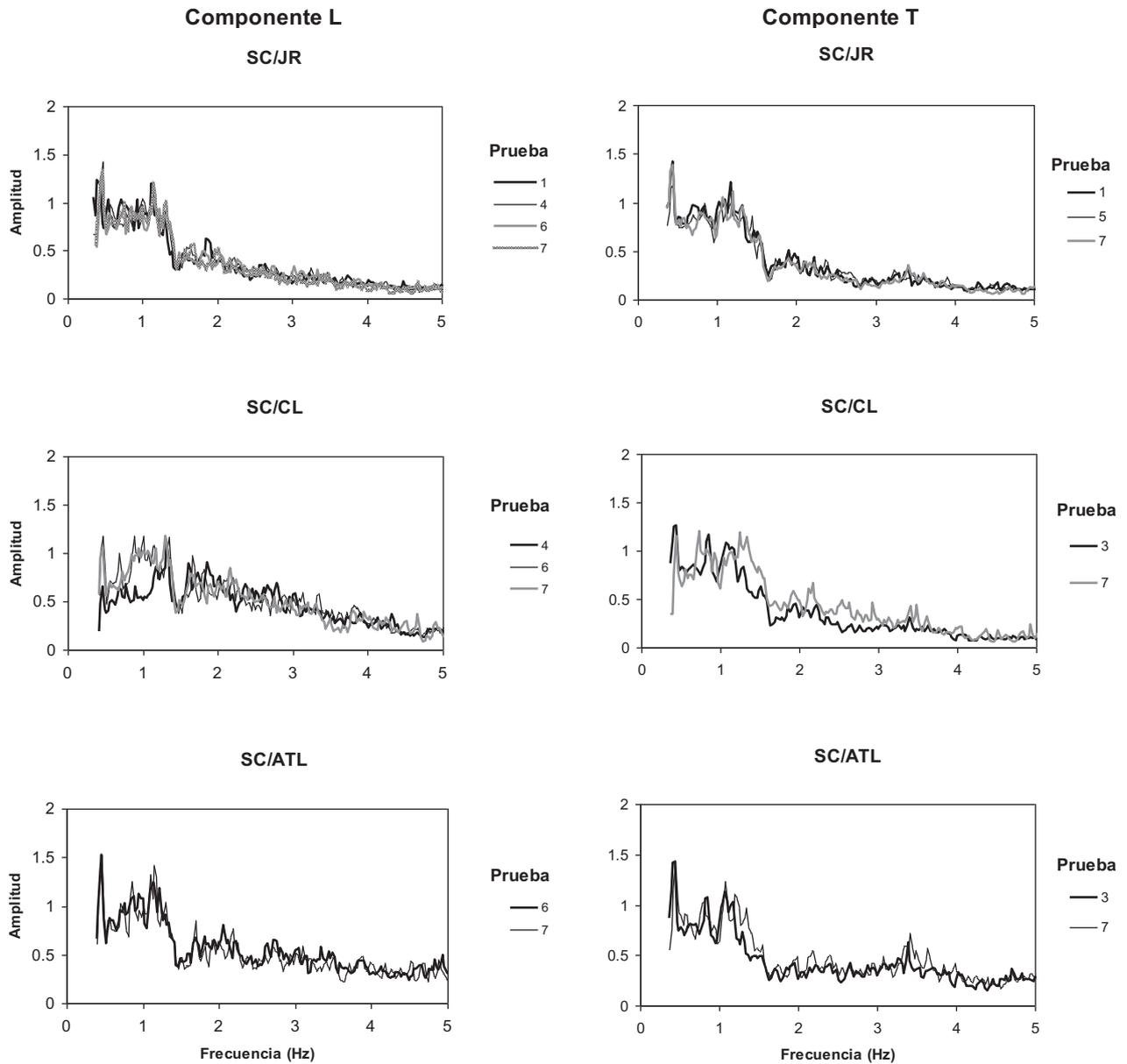


Figura IV.2.1.1 – Funciones de transferencia entre los puntos de sótano centro (SC) y terrenos (JR, CL y ATL) en los componentes L y T

IV.2.2 Resultados del método simplificado de Luco

Con el fin de determinar los efectos ISE se aplicó el método simplificado de Luco a los resultados de la prueba de vibración ambiental. Para la aplicación del método en los componentes de traslación se requirió obtener los espectros de potencia de las señales de traslación total en la azotea (AZC) y traslación en la base (SC) en direcciones T y L. también se requirieron los espectros correspondientes al sótano en el componente V (SN, SS, SE y SO) para determinar el cabeceo de la estructura en los componentes T y L. Los efectos de torsión no se determinan ya que el arreglo de pruebas fue estructurado para obtener información que permita determinar los efectos ISE en los componentes traslacionales L y T.

Para determinar los parámetros γ_1 , β_1 , M_1 e I_1 requeridos por el método de Luco, fue necesario recurrir a un modelo de la estructura para obtener las matrices de masas necesarias para el análisis y los vectores correspondientes a la primera forma modal (Ávila, 2000). En la tabla IV.2.2.1 se presentan los parámetros obtenidos para la aplicación del método.

Tabla IV.2.2.1 – Parámetros para la estimación de los efectos ISE con el método de Luco

Parámetro	Componente L	Componente T	Componente R
γ_1	1.09	1.17	0.95
β_1	1.54	1.62	1.34
M_1 (t . s ² /m)	670.27	567.03	-
I_1 (t . s ² .m)	-	-	45709

Conocidos estos parámetros, se seleccionan para cada uno de los espectros involucrados en el procedimiento las ordenadas asociadas con la frecuencias fundamentales identificadas para el sistema, y una vez conocidas estas ordenadas se procede a determinar las frecuencias de cabeceo y traslación de la base, además de la frecuencia fundamental de la estructura; en la tabla IV.2.2.2, se presentan las frecuencias mencionadas y los cocientes entre la frecuencia fundamental de la estructura y el sistema, además de los porcentajes de participación de los movimientos de traslación y cabeceo de la base en la respuesta total del sistema.

Tabla IV.2.2.2 – Parámetros de Luco obtenidos en el componente L y T

Componente	\bar{f}_1 (Hz)	f_1 (Hz)	f_c (Hz)	f_h (Hz)	$\frac{f_1}{\bar{f}_1}$	$\frac{H\Phi_{ri}}{X_T^{AZ}}$ (%)	$\frac{X_T^b}{X_T^{AZ}}$ (%)
L	0.464	0.516	1.563	1.450	1.111	8.1	6.6
T	0.439	0.486	1.406	1.481	1.108	8.3	5.4

De los resultados mostrados en las tablas IV.2.2.2 se observa que las frecuencias de la estructura y el sistema guardan una relación de 1.11 para ambos componentes. Por otro lado, los cocientes $H\Phi_{ri}/X_T^{AZ}$ indican que el movimiento de cabeceo de la base es ligeramente mayor en la contribución a la respuesta total del sistema respecto a la traslación X_T^b/X_T^{AZ} , y para el componente de torsión se puede ver que el porcentaje de contribución a la respuesta por parte de la torsión es muy pequeña.

Una vez determinadas las frecuencias de los movimientos de traslación y cabeceo de la base en los dos componentes de movimiento L y T, además de las asociadas con el movimiento de torsión mediante el método de Luco (1980), se determinan las rigideces asociadas a cada uno de estos movimientos con las expresiones III.3.14, III.3.15 y III.3.21

Tabla IV.2.2.3 – Rigideces del subsistema de interacción estimadas con el método de Luco

Modelo	Componente L		Componente T	
	Kc (N-m/rad x10 ¹³)	Kh (N/m x 10 ¹⁰)	Kc (N-m/rad x10 ¹³)	Kh (N/m x 10 ¹⁰)
VA-2	0.3	0.24	0.16	0.15

Aplicadas dichas expresiones se obtuvieron las rigideces del subsistema de interacción mostrados en la tabla IV.2.2.3, donde los resultados muestran que la rigidez tanto para cabeceo como para traslación es mayor en el componente L.

IV.3 Comparación de resultados

En la primera parte de esta sección se comparan las frecuencias de vibrar del edificio obtenidas en este capítulo (VA-2) con los resultados obtenidos de la prueba de vibración ambiental anterior (VA-1) y del análisis de registros sísmicos. En la segunda parte se comparan los efectos ISE del edificio con resultados disponibles de otros edificios que han sido estudiados por el Instituto de Ingeniería (II-UNAM) con el método simplificado de Luco.

IV.3.1 – Comparación de frecuencias de vibrar

Debido a que el edificio ha sido estudiado desde su instrumentación, en la tabla IV.3.1.1 se realiza una comparación entre los resultados obtenidos del análisis de registros sísmicos desde 1990 a 1999, y una prueba de vibración ambiental llevada a cabo en junio de 1999 (Murià Vila, *et al* 2000).

Tabla IV.3.1.1 – Valores de frecuencia en Hz indicados para los eventos registrados en el edificio PC

Evento	Intensidad (cm/s)	Modo	Componente		
			T	L	TORSIÓN
90-1	0.83	1	0.36-0.42	0.37-0.42	0.46-0.57
		2	1.18-1.32	1.15-1.28	1.49-1.76
		3	2.25-2.56	2.40-2.47	-----
93-4	1.35	1	0.36-0.42	0.36-0.43	0.47-0.57
		2	1.17-1.28	1.17-1.39	1.52-1.69
		3	2.24-2.72	2.19-2.53	2.30-2.62
93-11	2.91	1	0.32-0.43	0.35-0.41	0.45-0.54
		2	1.18-1.35	1.15-1.26	1.40-1.71
		3	2.34-2.66	2.29-2.61	2.34-2.55
94-1	0.48	1	0.35-0.42	0.35-0.43	0.47-0.52
		2	1.22-1.44	1.23-1.29	1.48-1.72
		3	2.36-2.49	1.99-2.22	2.30-2.51
94-3	6.45	1	0.31-0.42	0.33-0.42	0.42-0.51
		2	1.20-1.34	1.16-1.34	1.36-1.59
		3	2.03-2.84	2.09-2.52	2.05-2.40
95-1	21.4	1	0.31-0.39	0.32-0.40	0.42-0.59
		2	1.21-1.33	1.12-1.29	1.35-1.45
		3	2.04-2.73	1.90-2.55	2.01-2.42
95-2	9.24	1	0.32-0.38	0.32-0.38	0.39-0.44
		2	1.19-1.34	1.09-1.33	1.35-1.46
		3	1.93-2.49	1.94-2.33	2.07-2.34

Continuación Tabla IV.3.1.1

Evento	Intensidad (cm/s)	Modo	Componente		
			T	L	TORSIÓN
97-1	7.58	1	0.31-0.38	0.32-0.37	0.41-0.43
		2	1.11-1.26	1.10-1.23	1.26-1.58
		3	2.08-2.49	1.83-2.38	1.92-2.52
97-2	0.42	1	0.32-0.39	0.39	0.42-0.50
		2	1.07-1.20	1.06-2.25	1.33-1.60
		3	1.92-2.63	1.76-2.56	1.87-2.58
99-1	17.56	1	0.32-0.36	0.32-0.37	0.40-0.44
		2	1.00-1.172	1.05-1.19	1.27-1.56
		3	2.07-2.55	1.79-2.52	1.77-2.63
VA-1	-----	1	0.44	0.49	0.59
		2	1.71	1.47	1.86-2.2
99-2	0.71	1	0.34-0.40	0.34-0.40	0.41-0.46
		2	1.03-1.24	1.10-1.22	1.40-1.53
		3	1.95-2.63	1.78-2.52	1.85-2.50
99-3	20.88	1	0.33-0.37	0.35-0.37	0.41-0.43
		2	0.98-1.34	1.05-1.33	1.30-1.50
		3	2.08-2.62	1.86-2.61	1.91-2.56
99-4	0.65	1	0.35-0.40	0.35-0.40	0.43-0.55
		2	1.02-1.18	1.14-1.29	1.34-1.56
		3	2.17-2.56	1.76-2.53	1.86-2.48
VA-2	-----	1	0.44	0.46 - 0.49	0.59
		2	1.56 - 1.59	1.39 - 1.56	1.76 - 1.78
		3	2.95 - 3.13	2.44 - 2.56	3.05 - 3.70

Las frecuencias obtenidas a partir de las pruebas de vibración ambiental son mayores que las de registros sísmicos, esto se debe a la intensidad de los eventos y se puede apreciar si se comparan las frecuencias de los eventos 95-1, 99-1 y 99-3 que fueron mas intensos, estos tienen frecuencias menores respecto a las obtenidas en los eventos 94-1, 97-2 y 99-4 que fueron los de menor intensidad. Esto muestra que la diferencia entre las frecuencias obtenidas de la vibración ambiental y de registros sísmicos se debe a que la intensidad en una vibración ambiental es muy pequeña.

También se aprecia que las frecuencias de VA-2 son ligeramente menores para modos superiores en comparación con VA-1, esta diferencia se puede atribuir al deterioro de la estructura o al reacomodo de los materiales ya que entre el periodo de tiempo de una vibración a otra ocurrió un sismo de moderada intensidad (evento 99-3).

IV.3.2 - Comparación de los efectos de interacción suelo-estructura con resultados disponibles

Se cuenta con efectos ISE obtenidos del análisis de registros sísmicos en el edificio así como de los edificios JAL (Murià Vila y Rodríguez, 2002), SIS (Taborda, 2003) y TC (Camargo, 2007), así mismo se tienen los efectos ISE obtenidos de pruebas de vibración ambiental en los edificios JAL y TC.

Las características de los eventos sísmicos registrados en los edificios PC, JAL, SIS y TC se muestran en la tabla IV.3.2.1 y la comparación de los parámetros de Luco obtenidos de registros sísmicos y pruebas de vibración ambiental se muestran en las tabla IV.3.2.2. Para la comparación se eligieron los resultados de los tres últimos eventos disponibles en los edificios.

Tabla IV.3.2.1 – Características de los eventos sísmicos registrados en los edificios PC, JAL, SIS y TC

Evento	Fecha	Mw	Dist. epic (km)	Iarias (cm/s)	A máx L (cm/s ²)			A máx T (cm/s ²)		
					Terreno	Sótano	Azotea	Terreno	Sótano	Azotea
EDIFICIO PC										
99-1	15/06/99	6.70	223	17.56	24	19	70	28	24	108
99-3	30/09/99	7.4	437	20.88	23	23	116	27	28	141
99-4	29/12/99	5.90	304	0.65	6	5	24	6	5	18
EDIFICIO JAL										
95-1	14/09/95	7.5	298	19.3	35	32	116	37	34	130
99-1	15/06/99	6.7	222	13.7	20	19	86	25	23	225
99-3	30/09/99	7.40	455	19.4	22	21	116	34	33	304
EDIFICIO SIS										
01-1	8/10/01	6.1	44	16.42	77.5	57.6	165.9	88.4	48	164.7
01-2	8/10/01	3.4	43	0.184	9.7	3.7	8.0	15.0	6.5	18.6
01-3	29/10/01	4.0	30	0.019	4.0	2.4	4.0	8.1	2.9	10.5
EDIFICIO TC										
04-2	18/08/04	5.7	560	0.076	1.81	1.31	2.91	1.7	1.56	3.24
04-3	28/10/04	4.6	134	0.045	2.08	1	2.71	2.57	1.14	2.31

Tabla IV.3.2.2 - comparación de los parámetros de Luco obtenidos de registros sísmicos y pruebas de vibración ambiental en los componentes L y T

Edificio	Evento	\bar{f}_1 (Hz)	f_1 (Hz)	f_c (Hz)	f_h (Hz)	$\frac{f_1}{f_c}$	$\frac{H\Phi_{ri}}{X_T^{AZ}}$ (%)	$\frac{X_T^b}{X_T^{AZ}}$ (%)
COMPONENTE L								
PC	99-1	0.351	0.382	2.71	0.941	1.09	2	9
	99-3	0.363	0.387	2.342	1.186	1.07	2	6
	99-4	0.369	0.387	2.672	1.376	1.05	2	5
	VA-2	0.464	0.516	1.563	1.450	1.11	8	6
JAL	95-1	0.450	0.490	1.260	2.570	1.09	13	2
	99-1	0.520	0.590	1.340	1.920	1.11	14	5
	VA-8	0.780	1.000	2.590	1.430	2.59	29	6
	99-3	0.520	0.590	1.200	2.680	1.11	18	3
SIS	01-1	0.992	1.17	2.192	3.589	1.18	30	5
	01-2	1.038	1.186	2.353	5.236	1.14	28	3
	01-3	1.099	1.256	2.415	6.63	1.14	30	2
TC	04-2	0.385	0.446	0.941	1.311	1.16	12	5
	04-3	0.397	0.464	0.948	1.306	1.17	13	5
	VA-3	0.415	0.48	0.95	1.677	1.16	18	4
COMPONENTE T								
PC	99-1	0.327	0.384	0.824	0.956	1.17	13	7
	99-3	0.333	0.386	0.868	0.993	1.16	13	7
	99-4	0.354	0.426	0.803	1.037	1.20	17	7
	VA-2	0.439	0.486	1.406	1.481	1.11	8	5
JAL	95-1	0.280	0.290	1.180	1.720	1.04	6	2
	99-1	0.540	0.640	1.090	3.120	1.18	25	2
	VA-8	0.640	0.830	1.070	2.500	1.31	38	5
	99-3	0.450	0.510	1.080	1.970	1.13	17	4
SIS	01-1	0.784	0.848	2.406	3.970	1.08	16	3
	01-2	0.818	0.879	2.599	4.324	1.08	15	2
	01-3	0.842	0.921	2.525	3.660	1.09	17	4
TC	04-2	0.33	0.363	1.228	1.033	1.10	6	6
	04-3	0.336	0.361	1.371	1.245	1.07	5	4
	VA-3	0.366	0.411	0.996	1.353	1.12	13	5

En la tabla IV.3.2.2, se comparan los parámetros de Luco obtenido de los registros sísmicos y de pruebas de vibración ambiental. En ellos se aprecia que en el componente L todos los edificios muestran que la contribución del cabeceo es mayor que la traslación, excepto en el edificio PC, donde los resultados obtenidos son del orden. En el componente T, este comportamiento se presenta para los edificios PC y SIS. El edificio TC muestra que la contribución de cabeceo y

traslación son del orden. En el caso del edificio JAL, (Murià Vila y Rodríguez, 2002), se aprecia que para el componente T en el evento 95-1, las contribuciones por parte del cabeceo y traslación de la base son del orden, pero para los eventos 99-1 y 99-3 la contribución del cabeceo es mucho menor que la de traslación. Esta diferencia se presenta debido a que después del evento 95-1 se llevo a cabo una rehabilitación de la estructura, por lo que hubo un incremento en la rigidez en el componente T.

Con base en la comparación de resultados en los edificios estudiados por el II-UNAM, podemos decir que en la mayoría de ellos, la contribución por parte del cabeceo es mayor que la traslación de la base. El hecho de que el movimiento de cabeceo de la base sea significativo en la respuesta total del sistema, depende de la rigidez de la estructura y del tipo de cimentación del edificio, ya que si una estructura presenta poca rigidez en cierto componente, existirían mayores movimientos de entrepiso, siendo estos movimientos los que tendrían mayor contribución al movimiento total de la estructura, y si la estructura se encuentra apoyada sobre pilotes de punta, esto limitaría el movimiento de cabeceo de la base.

En el caso del edificio PC en el componente L, existen muros de concreto que rigidizan este componente, por lo que este comportamiento no se puede atribuir a falta de rigidez, y aunque no se tiene clara la causa de dicho comportamiento, es probable que se presente debido a alguna restricción que no permita el cabeceo de la estructura que podría darse en caso de que los pilotes de fricción hayan alcanzado un estrato firme, y aunque el perfil de velocidades del edificio (figura II.3.1) no respalda dicha suposición, tampoco se puede descartar que exista algún lente de arena que no haya sido visible en el punto donde se llevo a cabo la prueba. Otra probable explicación sería que la presencia de la estructura vecina del lado norte del edificio limite dicho movimiento.

Conclusiones y comentarios

En el presente trabajo se realizó una prueba de vibración ambiental, en la cual se instrumentaron puntos en el terreno y estructura para determinar los efectos ISE.

Se instrumentaron tres puntos en el terreno (JR, CL y ATL), de los cuales se analizaron sus espectros de potencia obtenidos a lo largo de las pruebas. La mayoría de los espectros de las diferentes estaciones de terreno muestran congruencia entre sus pruebas en bajas frecuencias, excepto la estación CL en el componente L durante la prueba 4 que presenta mayores amplitudes. Así mismo existen diferencias de los espectros en altas frecuencias en la mayoría de las estaciones de terreno, esto se debe principalmente a que las intensidades de vibración en el edificio pueden cambiar a lo largo de las pruebas, pero ya que para determinar los efectos ISE se utilizan las frecuencias fundamentales ubicadas en bajas frecuencias, estas diferencias no afectan el análisis.

De los tres puntos de terreno analizados en la prueba de vibración ambiental, el punto JR se ubicó sobre la estación de terreno en la instrumentación permanente, esto con la finalidad de confirmar que en dicho lugar se obtiene información representativa del terreno circundante del edificio, y dados los resultados del análisis se puede concluir que en dicha estación se obtiene información aceptable.

Se identificaron las frecuencias de vibrar de la estructura, y haciendo la comparación con las obtenidas a partir de registros sísmicos y una prueba de vibración ambiental anterior, se notaron diferencias que se atribuyen al deterioro de la estructura o al reacomodo de los materiales, ya que en el edificio se han presentado sismos de moderada intensidad.

Se determinaron los efectos ISE en el edificio aplicando el método simplificado de Luco, mediante el cual se identificaron las frecuencias de los componentes de movimiento del sistema. Los resultados obtenidos con el método de Luco mostraron que las contribuciones a la respuesta por parte de la traslación y cabeceo de la base son del orden, aunque el movimiento de cabeceo es ligeramente mayor, y esto confirma el hecho de que a partir de los registros sísmicos la contribución por parte del cabeceo es menor a la de traslación.

Se realizó una comparación de resultados de los edificios JAL, SIS y TC estudiados por el Instituto de Ingeniería (II-UNAM). De esta comparación se obtuvo que en la mayoría de los edificios la contribución por parte del cabeceo es mayor que la de traslación. Este comportamiento no se presenta en el edificio TC en la componente T ya que esta es la componente que presenta menos rigidez por que los muros de concreto rigidizan la otra componente. En el caso del edificio JAL existía este comportamiento debido a una pérdida de rigidez en la componente T, pero después de una rehabilitación hubo un incremento importante en la contribución por parte del cabeceo.

En el caso del edificio PC a diferencia del edificio JAL, la baja contribución por parte del cabeceo no se puede atribuir a una falta de rigidez en el componente L ya que los muros de concreto que rigidizan dicha componente no presentan grietas que indiquen pérdida de rigidez, y aunque no se encuentra una razón clara de por qué se presenta este comportamiento, se especula que algo restringe el movimiento de cabeceo, esto podría deberse a una estructura vecina o a que los pilotes de fricción hayan alcanzado alguna capa dura.

Referencias

Alcántara, L., Almora, D., Quaas, R. y Macías M. (1991), "Instrumentación sísmica de dos edificios en la ciudad de México", *Memorias IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Manzanillo, Colima, noviembre, p 2-139 a 2-148.

Alcántara N., Almora M., Castro G., Torres M., Vázquez R., Ylizaliturri J. (1997), "Sistema de interrogación telefónica en la red sísmica del edificio Plaza Córdoba", *XII Congreso de Instrumentación*, San Luís Potosí, SLP, México.

Alcántara N., Almora M., Castro G., Torres M., Macías M., Vázquez R., Ylizaliturri J., Sandoval H., Sandoval I. (2001), "El sismo del 8 de octubre de 2001 (M=6.1) en el edificio Plaza Córdoba, acelerogramas obtenidos", *Proyecto 0542*, Instituto de Ingeniería, UNAM, octubre.

Ávila J. (2000), "Cálculo de la respuesta sísmica de un edificio real de 16 niveles, instrumentado después de los sismos de 1985" *Proyecto 0516*, Instituto de Ingeniería, UNAM, octubre de 2000.

Bendat J. S. y Piersol A. G. (1989), *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Wiley Interscience, Nueva York

Camargo J. (2007), "Análisis de registros sísmicos en un edificio alto cercano a la estación SCT", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Contreras R. (1997), "Desarrollo y aplicaciones de un dispositivo para medir la velocidad de ondas de corte en campo", *Tesis de Maestría*, División de estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Correa V. M (2005), "Respuesta dinámica y efectos de interacción suelo-estructura en tres edificios instrumentados en México", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Correa V. M. y Murià Vila D. (2005), "Efectos de interacción suelo-estructura de un edificio instrumentado con modos de vibración acoplados", *Memorias del XV congreso nacional de Ingeniería sísmica*, Acapulco Gro., México.

Cruz C. A., Camargo J., Taborda R. y Murià Vila D. (2006). "Macros para la captura y procesamiento de resultado de señales procesadas espectralmente", Instituto de Ingeniería, UNAM.

- Gómez A. (2000), "Presentación de un modelo matemático para el cálculo del periodo fundamental de vibración en suelos estratificados con capacidad de predecir efectos de amplificación o atenuación dinámica", *XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, noviembre.
- Guzmán S., Guzmán I., Murià Vila D., Fernández F (1992). "Diseño e Implementación de Captura y Procesamiento de Señales", Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 0707, octubre.
- Jaime A., Romo M. (1987), "Características del suelo en el sitio Plaza Río de Janeiro", Proy. 6504, *Informe Interno del Instituto de Ingeniería*, UNAM; enero, 1987.
- Luco, J. E. (1980), "Soil-structure interaction and identification of structural models", *Proc. 2nd ASCE Speciality Conference in Civil Engineering and Nuclear Power*, Knoxville, Tennessee, vol II, paper n 10-1, p 10.1.1-10.1.31.
- Luco J. E. , Trifunac M. D., Wong H. L. (1987), "On the apparent change in dynamic behavior of a nine-story reinforced concrete building", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 77, N° 6, pp. 1961-1983.
- Martínez R. (1989), "Respuesta teórica y experimental de un edificio de 17 niveles sobre suelo blando", *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Mendoza, L., Reyes, A. y Luco, E. (1991), "Ambient vibration test of the Mexicali general hospital", *Earthquake Spectra*, vol 7, n 2.
- Murià Vila, D. y González Alcorta, R. (1995), "Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México", *Revista de Ingeniería sísmica*, No. 51, 25-45 (1995).
- Murià Vila D, (Coordinador), Alcántara L.; Durán R.; Macías M.; Maldonado S.; Pérez L.E., A. Tena, Vázquez R., (1997) Edificios Instrumentados, Macrosismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995, *Capítulo 9*, septiembre, editado por A. Tena, ISBN: 968-6190-83-X, Colima, 197-232, México
- Murià Vila D, Macias C. M. A., Rodríguez G. G., Soto C. U. (2000), "Análisis de los registros sísmicos obtenidos en el edificio PC de 1990 a 1999". Proy 0520, Instituto de Ingeniería, UNAM, octubre 2000.
- Murià Vila, D, Rodríguez, G; Zapata, A; Toro, A.M, (2001a) "Seismic response of a twice-retrofitted building", *ISET Journal of Earthquake Technology*, v 38, n (2-4), 67- 92, enero, India
- Murià Vila D., Rodríguez G., Palacios C., Macías M. (2001b), "Estimación de los parámetros dinámicos del edificio PC" *Proyecto 1543 Instituto de Ingeniería*, UNAM, diciembre 2001.

Murià Vila, D., Rodríguez, G., (2002) Análisis de los registros sísmicos obtenidos de 1993 a 1998 en el edificio JAL, diciembre, editado por Instituto de Ingeniería UNAM, colección: Serie Azul No. 628, México, 1-218, México

Murià Vila D., Taborda R., Zapata A. (2004), "Soil-structure interaction effects in two instrumented tall buildings" Memorias de la 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, agosto 1-6, 2004.

Murià Vila D., (2007), "Experiencia Mexicana sobre la Respuesta Sísmica de Edificios Instrumentados", Instituto de Ingeniería, UNAM, septiembre 2007.

Ovando E., Romo M. (1991), "Estimación de la velocidad de ondas S en la arcilla de la ciudad de México con ensayos de cono", *Sismodinámica*, pp. 107-123.

Palacios C. (2003), "Estimación de los parámetros dinámicos del edificio PC", *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Rodríguez, N. y Quaas, R. (1990), "Respuesta estructural de un edificio instrumentado en la ciudad de México, durante sismos recientes", *Memorias del Seminario Internacional sobre Instrumentación Sísmica y uso de Elementos Disipadores de Energía en el Comportamiento Estructural*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, D.F., octubre.

Rodríguez-Cuevas N. (1992), "Response measurements of tall building under seismic excitation", *Earthquake Engineering Tenth World Conference*, Balkema, Róterdam, pp. 2665-2671.

Taborda R. (2003), "Respuesta dinámica y efectos de interacción suelo-estructura de un edificio instrumentado en Acapulco", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería, UNAM.

Trifunac M. D. y Todorovska M. I. (1999), "Recording and interpreting earthquake response of full-scale structures", Proc. Nato Advanced Research Workshop on Strong-Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures, Istanbul, Turquia, Junio 2 a 5, Kluwer Academic Publ., pp. 131-155.