

2 60
eje.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica

IDENTIFICACION DE PARAMETROS ESTRUCTURALES
EN EL EDIFICIO JALAPA 15

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

presenta

LUIS ENRIQUE HERNANDEZ CRUZ



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MÉXICO, D. F.

ENERO, 1994



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-166/93

Señor
LUIS ENRIQUE HERNANDEZ CRUZ
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. RICARDO GONZALEZ ALCORTA, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

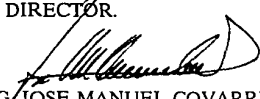
**"IDENTIFICACION DE PARAMETROS ESTRUCTURALES
EN EL EDIFICIO JALAPA 15"**

- I. INTRODUCCION
- II. REVISION BIBLIOGRAFICA
- III. DESCRIPCION DEL EDIFICIO
- IV. SIMULACION MATEMATICA
- V. INTERPRETACION DE LOS REGISTROS SISMICOS
- VI. ESTIMACION DE PARAMETROS
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS
- TABLAS Y FIGURAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 21 de octubre de 1993.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR*mccm

M.

A mis padres

Angelina Cruz de Hernández y Merced Hernández Sánchez,
por su apoyo y confianza depositada en los momentos más difíciles;
gracias, por ser para mis hermanos y para mi un ejemplo de lucha
y de superación

A mis hermanos

Victor Manuel, Laura Lilia y Delia,
por los consejos y los momentos felices que
hemos pasado juntos y que me han hecho sentir
que cuento con ustedes en cualquier circunstancia.

A

Victor Manuel, su esposa Elvira y al bebé Victor Jr,
por seguir formando con nosotros una familia

A mis familiares

AGRADECIMIENTOS

Hago patente mi agradecimiento al M. en I. Ricardo González Alcorta, por su acertada dirección para la elaboración de esta tesis, por compartir sus conocimientos académicos y experiencia profesional, así como por la amistad profesada durante todo este tiempo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, y en especial a la Facultad de Ingeniería y a sus profesores por los conocimientos otorgados durante estos años de estudio.

Al Instituto de Ingeniería por las facilidades otorgadas para la realización de esta tesis

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	1
Objetivos	3
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1.1 El método de Identificación de Sistemas	4
1.2 La estimación de parámetros como un problema de minimización	6
1.3 Identificación de sistemas en la Ingeniería Estructural	11
2. DESCRIPCIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL EDIFICIO	15
2.1 El objetivo de la instrumentación sísmica	15
2.2 Descripción de la estructura	17
2.3 Instrumentación sísmica	18
3. SIMULACIÓN MATEMÁTICA	20
3.1 Descripción del programa de computadora utilizado	21
3.2 Representaciones de estado	21
3.3 El método β de Newmark	22
3.4 Simulaciones de sistemas estructurales	26
3.4.1 Modelo de un grado de libertad	27
3.4.2 Modelo de dos grados de libertad	30
3.4.3 Modelo de tres grados de libertad	33
3.4.4 Modelo de cinco grados de libertad	35
4. INTERPRETACIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS	39
4.1 Sismos registrados	39
4.2 Funciones de transferencia	40
4.3 Determinación de las frecuencias de vibrar	41
5. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS	43
5.1 Estimación de parámetros	43
5.1.1 Modelo de un grado de libertad	44

5.1.2 Modelo de tres grados de libertad	45
5.1.3 Modelo de cinco grados de libertad	49
5.2 Comentarios	53
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
Referencias	56
Tablas y Figuras	

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

A raíz de la gran cantidad de daños sufridos por los movimientos sísmicos de 1985 y dadas las incertidumbres que se tienen del comportamiento dinámico real de los edificios y de los modelos matemáticos que lo idealizan, se realizaron en México campañas de medición ambiental de edificios existentes, a fin de formar un catálogo de estos y tener un seguimiento de su comportamiento ante futuros eventos sísmicos. Aunque la determinación de parámetros estructurales por medio de vibraciones ambientales sin duda proporciona información muy valiosa, ésta sólo es aplicable para el intervalo lineal de su comportamiento.

Está bien establecido que los parámetros dinámicos obtenidos en el intervalo lineal del comportamiento de una estructura pueden sufrir variaciones significativas durante un movimiento sísmico severo, lo que ocasiona errores en la estimación teórica de su comportamiento. A fin de evaluar estas variaciones y dadas las incertidumbres que existen en la estimación del comportamiento dinámico real de las estructuras, se iniciaron en México programas de instrumentación con aparatos de registro sísmico de tipo permanente. Actualmente en la ciudad de México existen alrededor de 10 edificios instrumentados, entre los cuales destaca el edificio Jalapa 15, localizado en la zona de terreno compresible de la ciudad.

El edificio Jalapa 15 es una estructura de 14 niveles instrumentada con 14 acelerógrafos a partir de octubre de 1992. El 14 de mayo de 1993 se registraron en el edificio dos movimientos sísmicos, asociados a temblores moderados ocurridos frente a las costas de Oaxaca, con una magnitud de $M=5.8$ y $M=6.0$, respectivamente. Desde 1989, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) se han realizado estudios analíticos sobre el

comportamiento lineal y no lineal del edificio, así como pruebas experimentales de vibración ambiental (Murià, González y Moreno, 1993).

En dicho edificio se ha utilizado un enfoque directo para el estudio de su respuesta dinámica; es decir, se emplean las aceleraciones obtenidas en campo libre como excitación en la base del modelo y se propone la forma y el tipo de modelo matemático a partir de programas de computadora desarrollados expresos (ETABS, SAP90, DRAIN-2D, etc.), correlacionando la respuesta del modelo con la obtenida experimentalmente. Si la correlación de la respuesta se juzga satisfactoria, el modelo es adecuado; de suceder lo contrario éste debe ser modificado. La manera tradicional de realizar el ajuste de los parámetros del modelo carece de un criterio riguroso, ya que se basa fundamentalmente en estimarlos a partir de fórmulas propuestas en artículos e investigaciones relacionadas con el tema.

En realidad, muy pocos sistemas estructurales pueden modelarse usando exclusivamente un planteamiento teórico, ya que existen parámetros en el modelo analítico, particularmente parámetros constitutivos, los cuales deben asumirse o determinarse empíricamente. La instrumentación de los edificios puede proporcionar información experimental muy valiosa que la teoría por sí misma no puede proporcionar. Sin embargo, los datos experimentales frecuentemente son incomprensibles sin un marco teórico que permita la reducción de datos. La identificación de sistemas y la estimación de parámetros son herramientas naturales para ser el enlace entre un modelo analítico y los datos experimentales. La aplicación de estas técnicas en la ingeniería estructural se ha incrementado significativamente en años recientes, motivada fundamentalmente por el deseo de tener una descripción más adecuada de las estructuras y sus características dinámicas, a fin de conocer su respuestas ante diferentes tipos de excitación, así como la estimación del daño a través del cambio de los parámetros que las caracterizan.

Objetivos

En este estudio se establece una metodología para evaluar los parámetros estructurales para comportamiento lineal de edificios instrumentados, utilizando la técnica de Identificación de Sistemas. Se estudia el edificio Jalapa, actualmente instrumentado con aparatos de registro sísmico. Del edificio se cuenta con información de planos estructurales, mediciones de vibración ambiental y registros sísmicos. Los parámetros evaluados son los asociados a la rigidez y amortiguamiento de la estructura, así como a los de cabeceo y traslación de la base de las misma. Se analizará exclusivamente el comportamiento lineal de la estructura.

Este trabajo se compone de seis capítulos. En el capítulo uno se proporciona una descripción general del método de estimación de parámetros utilizado en este trabajo y se presenta un panorama de la aplicación del método de identificación de sistemas en la ingeniería estructural. En el capítulo dos se hace una descripción detallada del edificio y de su instrumentación sísmica. En el capítulo tres se realiza una serie de simulaciones matemáticas en modelos de diversa complejidad, a fin de evaluar la eficiencia de los algoritmos propuestos. En el capítulo cuatro se hace un análisis de los registros sísmicos, a fin de obtener la información necesaria que nos permita dar una aproximación de los parámetros a evaluar (rigidez y amortiguamiento). El capítulo cinco presenta la aplicación de las estrategias y algoritmos desarrollados en las simulaciones. Finalmente, en el capítulo seis se exponen las principales conclusiones de este estudio.

CAPÍTULO 1

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 El Método de Identificación de Sistemas

La identificación de sistemas se puede definir como el proceso para seleccionar un modelo matemático, usando información experimental medida, en donde se realice un ajuste sistemático de sus parámetros con base en un criterio predefinido de tal manera que establezca la mejor correlación posible entre las respuestas predichas por el modelo matemático y las obtenidas experimentalmente. En el proceso de identificación se pueden distinguir tres etapas (Bekey, 1970):

- a) La determinación de la forma del modelo y sus parámetros
- b) La selección de una función donde se establezca un criterio de error entre las respuestas del modelo y el sistema real. Generalmente, esta función recibe el nombre de Función Criterio
- c) La selección de un algoritmo o estrategia para el ajuste de los parámetros de tal forma que las diferencias entre las respuestas del modelo y el sistema real, medidas por la función criterio mencionada, se minimicen

En el método de identificación de sistemas la selección de la forma del modelo matemático es la parte más importante del proceso. Si se hace una selección pobre del tipo del modelo, por más sistemático que sea el ajuste desarrollado, no se alcanzará una correlación aceptable de las respuestas. Un modelo adecuado es aquel que no únicamente produce una buena correlación con la respuesta medida, sino aquel que contenga términos que se puedan relacionar directamente con propiedades físicas definidas. En la ingeniería estructural, afortunadamente,

están relativamente bien establecidas las leyes que gobiernan el comportamiento físico de los sistemas y los términos que deben ser incluidos en el planteamiento matemático. Una vez que se define el tipo de modelo, con el grado de refinamiento adoptado (comportamiento histerético, degradación de rigidez y/o resistencia, etc.), el paso final de esta etapa es el aislar los parámetros desconocidos a evaluar, generalmente asociados a la rigidez y amortiguamiento del sistema, así como a parámetros que definen las leyes constitutivas del mismo.

La siguiente etapa en el proceso de identificación es el establecimiento de una función para evaluar el error entre la respuesta del sistema real y la estimada del modelo matemático. La tercera y última etapa del proceso de identificación es la selección de un algoritmo que sistemáticamente ajuste los parámetros en el modelo matemático de tal forma que la función criterio (J) se minimice. En la teoría de optimización matemática existe un gran número de métodos que se pueden usar como estrategia para el ajuste de los parámetros; sin embargo, en algunos de ellos no se encuentra una convergencia incondicional. Los métodos para la estimación de parámetros se pueden dividir en (Lung, 1987):

- a) **Métodos Iterativos;** en los cuales se asignan valores a los parámetros y se evalúa la función criterio para todo el intervalo de muestreo, de tal forma que iterativamente se busca el mínimo de la función. Los métodos comúnmente usados para evaluar la función criterio son los de mínimos cuadrados y los de máxima verosimilitud. Para la estrategia de minimización se utilizan métodos como el de Newton, Newton-Raphson y Gauss-Newton, entre otros
- b) **Métodos Recursivos;** con los cuales es posible realizar el ajuste de los parámetros en cada intervalo de tiempo. Estos métodos también son conocidos como "en línea" y "en tiempo real". Dentro de las principales estrategias destaca la del filtro de Kalman (Kalman, 1960), la cual ha sido aplicada ampliamente para el estudio de sistemas con parámetros variantes en el tiempo

Existen en la literatura diversos artículos que llevan a cabo una revisión del estado del arte sobre el tema, en los que destacan, cronológicamente, los de Bekey (1970), Sage (1972), Hart and Yao (1977), Kozin y Natke (1986) y Natke (1990). En general, estos estudios concluyen que existe una gran variedad de aplicaciones y alcances del método, la gran mayoría de ellos asociados con la respuesta lineal de estructuras.

1.2 La estimación de parámetros como un problema de minimización

Un modelo matemático realista debe ser capaz de reproducir una respuesta que se ajuste a la respuesta de una estructura real, cuando ambos se someten a la misma excitación. La función criterio (J) indica qué tan bien está hecho el ajuste entre las respuestas mencionadas.

La función criterio utilizada en esta tesis es una función integral que evalúa el error cuadrático de desplazamiento y velocidad. Si β es el vector de parámetros y T es el intervalo de integración, la función criterio se puede escribir como:

$$J(\beta, T) = \int_0^T \{ [\dot{x}(\beta, t) - \dot{y}(t)]^2 + [x(\beta, t) - y(t)]^2 \} dt$$

donde $\dot{x}(\beta, t)$ y $x(\beta, t)$ son las velocidades y desplazamientos, respectivamente, calculados en el modelo matemático utilizando parámetros β y excitación $\ddot{x}_g(t)$; y $\dot{y}(t)$ y $y(t)$ son las velocidades y desplazamientos de la estructura real cuando se le somete a la misma excitación. El límite inferior en la integración corresponde a las condiciones iniciales en el modelo matemático.

La respuesta del modelo para una excitación específica se encuentra proporcionando al mismo los valores de los parámetros e integrando paso a paso el modelo matemático. Se eligió en este trabajo el modelo β de Newmark para realizar la integración numérica (Newmark, 1959).

El siguiente paso en la estimación de parámetros es la selección de un algoritmo que sistemáticamente ajuste los parámetros en el modelo matemático hasta que la función que evalúa el error se minimice. Conviene pensar que la función que evalúa el error queda descrita por una superficie n-dimensional dentro de un espacio de n+1 dimensiones. Esto es, que cada conjunto de n parámetros proporciona un punto (error) en la superficie. Desde este punto de vista, el objetivo consiste en encontrar las coordenadas (parámetros) del punto mínimo de la superficie.

Existen muchas técnicas para resolver el problema de minimización, donde la gran mayoría de ellas caen dentro de lo que se conoce como métodos iterativos de minimización. Los algoritmos iterativos se pueden describir de la siguiente forma: Se selecciona un vector de parámetros iniciales β_0 y el algoritmo selecciona un vector mejorado β_1 . El proceso se repite, en donde se encuentra un mejor vector β_2 . Si de esta manera se continúa el proceso, se cuenta entonces con una secuencia de vectores $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k, \dots$, hasta que se encuentra el vector solución β_* . En problemas reales, la secuencia nunca encuentra realmente el vector solución dado que el proceso se termina cuando se encuentra un vector suficientemente cercano a la solución. Este vector final se denomina "vector minimizado", y se designa como β_{\min} .

La eficiencia del esquema iterativo depende en gran medida de la primera estimación β_0 . Una mala elección de este vector trae como consecuencia, en el mejor de los casos, un incremento significativo del número de iteraciones requeridas, aunque normalmente provoca que la solución converja a un mínimo local de la superficie n-dimensional.

Generalmente los parámetros pueden estimarse relativamente bien a partir de propiedades geométricas y de los materiales (como el caso del parámetro de masa), así como datos provenientes de pruebas experimentales. Sin embargo, es generalmente difícil establecer una buena estimación en otro tipo de parámetros, especialmente aquellos asociados a términos no

lineales.

Asimismo, debe tenerse mucho cuidado al moverse de un punto a otro en el proceso iterativo, de tal forma que ninguno de los parámetros de ese nuevo punto viole las restricciones físicas conocidas del comportamiento estructural. Todos los parámetros considerados en este trabajo presentan restricciones: los parámetros de amortiguamiento (c) y de rigidez (k) deben ser positivos.

La ecuación fundamental del método iterativo que se consideró es

$$\beta_i = \beta_{i-1} + \alpha \bar{d}_{i-1}$$

donde \bar{d}_{i-1} es un vector de dirección; y

α es el tamaño del paso

El método de *descenso acelerado* es uno de los más simples para resolver problemas de minimización no restringida, el cual usa para \bar{d}_{i-1} el gradiente negativo, $\nabla \bar{J}(\beta_{i-1}, T)$, el cual es por definición la dirección del máximo decremento en la superficie. El tamaño del paso se encuentra al establecer una búsqueda unidimensional que minimice o al menos disminuya la función en esa dirección. Este método, aunque apropiado para muchas aplicaciones, tiene algunas desventajas: la búsqueda para un valor apropiado de α es tediosa; la convergencia se afecta por la transformación de variables (escala); y, tal vez la más importante, la lentitud en la convergencia cerca del mínimo. Para eliminar estas desventajas se decidió utilizar en este trabajo el método de Gauss-Newton modificado, que es más sofisticado que el método descrito anteriormente.

El método de Gauss-Newton. El método de Gauss-Newton se deriva al desarrollar la función

que evalúa el error en una serie de Taylor para un punto previo β_{i-1} (suponiendo que todas las derivadas existen), y considerando exclusivamente los primeros tres términos de la serie. En notación matricial:

$$J(\beta_i, T) = J(\beta_{i-1}, T) + \overline{\nabla J}^T(\beta_{i-1}, T)(\beta_i - \beta_{i-1}) + \frac{1}{2}(\beta_i - \beta_{i-1})^T \overline{\nabla^2 J}(\beta_{i-1}, T)(\beta_i - \beta_{i-1})$$

donde $\overline{\nabla J}(\beta_{i-1}, T)$ es el vector gradiente; y

$\overline{\nabla^2 J}(\beta_{i-1}, T)$ es la matriz Hessiana

Para minimizar $J(\beta, T)$, el gradiente con respecto a β_i se iguala al vector cero:

$$\overline{\nabla J}(\beta_{i-1}, T) + \overline{\nabla^2 J}(\beta_{i-1}, T)(\beta_i - \beta_{i-1}) = \vec{0}$$

o, si la matriz Hessiana es invertible:

$$\beta_i = \beta_{i-1} - \overline{\nabla^2 J}^{-1}(\beta_{i-1}, T) \overline{\nabla J}(\beta_{i-1}, T)$$

Esta ecuación, en la cual la inversa de la matriz Hessiana modifica tanto la magnitud como la dirección, define el método de Newton.

Para asegurar que el error decrezca en cada dirección, se inserta un escalar positivo α , de tal forma que el tamaño del paso se pueda ajustar separadamente. La ecuación resultante:

$$\beta_i = \beta_{i-1} - \alpha \overline{\nabla^2 J}^{-1}(\beta_{i-1}, T) \overline{\nabla J}(\beta_{i-1}, T)$$

define el método de Newton modificado.

Las componentes del vector gradiente y de la matriz Hessiana se encuentran al tomar las derivadas apropiadas de la función que evalúa el error. Por ejemplo, el j-ésimo componente del vector gradiente es:

$$\frac{\partial}{\partial \beta_j} J(\beta, T) = \nabla_j J(\beta, T) = 2 \int_0^T \left\{ [\dot{x}(\beta, t) - \dot{y}(t)] \frac{\partial \dot{x}(\beta, t)}{\partial \beta_j} + [x(\beta, t) - y(t)] \frac{\partial x(\beta, t)}{\partial \beta_j} \right\} dt$$

donde β_j se refiere al j-ésimo parámetro. El jk-ésimo componente de la Hessiana es

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial \beta_j \partial \beta_k} J(\beta, T) &= \nabla^2_{jk} J(\beta, T) \\ &= 2 \int_0^T \left[\frac{\partial \dot{x}(\beta, t)}{\partial \beta_j} \frac{\partial \dot{x}(\beta, t)}{\partial \beta_k} + \frac{\partial x(\beta, t)}{\partial \beta_j} \frac{\partial x(\beta, t)}{\partial \beta_k} \right] dt + 2 \int_0^T \left\{ [\dot{x}(\beta, t) - \dot{y}(t)] \frac{\partial^2 \dot{x}(\beta, t)}{\partial \beta_j \partial \beta_k} + [x(\beta, t) - y(t)] \frac{\partial^2 x(\beta, t)}{\partial \beta_j \partial \beta_k} \right\} dt \end{aligned}$$

En el método de Gauss-Newton se elimina la segunda integral de la matriz Hessiana. El jk-ésimo término de la matriz resultante está dado por:

$$AH_{jk}(\beta, T) = 2 \int_0^T \left[\frac{\partial \dot{x}(\beta, t)}{\partial \beta_j} \frac{\partial \dot{x}(\beta, t)}{\partial \beta_k} + \frac{\partial x(\beta, t)}{\partial \beta_j} \frac{\partial x(\beta, t)}{\partial \beta_k} \right] dt$$

Esta matriz simétrica, que comúnmente se le conoce como matriz Hessiana aproximada, se acerca a la Hessiana conforme en el proceso iterativo los errores tiendan a cero y las segundas derivadas parciales no se incrementen más rápido que el decremento en los errores. El método de minimización resultante, llamado método de Gauss-Newton modificado debido a la presencia de α , se define como:

$$\beta_i = \beta_{i-1} - \alpha \overline{AH}^{-1}(\beta_{i-1}, T) \overline{\nabla J}(\beta_{i-1}, T)$$

Esta ecuación, la cual se aplica en los algoritmos utilizados en este trabajo, es ampliamente usada en optimización y tiene las ventajas de una rápida convergencia cerca del mínimo sin tener la desventaja de calcular las segundas derivadas parciales.

1.3 Identificación de sistemas en la Ingeniería Estructural

Existe un gran número de aplicaciones del método de identificación de sistemas a la ingeniería estructural, motivados fundamentalmente por el deseo de tener una descripción más adecuada de las estructuras y sus características dinámicas. Los procedimientos de identificación se pueden dividir en técnicas en el dominio del tiempo y técnicas en el dominio de la frecuencia. Las técnicas en el dominio del tiempo se basan en la estimación de parámetros utilizando la historia de la respuesta estructural, con base ya sea en métodos iterativos o recursivos. Las técnicas en el dominio de la frecuencia se relacionan con estimaciones espectrales e identificación de características dinámicas a partir de la respuesta en frecuencia del sistema.

Las aplicaciones en la ingeniería estructural de las técnicas en el dominio del tiempo reportadas en la literatura se pueden agrupar dentro de tres líneas de investigación :

- a) Ensayes en prototipos experimentales en pruebas de laboratorio
- b) Edificios instrumentados con aparatos de registro sísmico
- c) Criterios para la estimación del nivel de daño en edificios

Aplicación a prototipos experimentales. El uso de técnicas de identificación paramétrica en prototipos experimentales es motivada por el hecho de que en este tipo de sistemas estructurales se tiene un mayor control tanto del tipo de excitación a la que se somete el prototipo como de la respuesta del mismo, gracias a los avances recientes en los equipos de adquisición de datos experimentales.

Al tener el control del tipo de excitación en la base del prototipo, caracterizado principalmente por el nivel de aceleración y el contenido de frecuencias de la señal de excitación, es posible ajustar el mismo para que el prototipo presente ya sea un comportamiento lineal o bien francamente no lineal, por lo que se pueden realizar estudios para estos tipos de comportamiento en un mismo prototipo experimental. Dentro de los estudios mas relevantes en esta línea de investigación destacan los de Matzen y McNiven (1976), Kaya y McNiven (1978), Jurukovski (1987) y Jurukovski y Jovanovic (1990).

Aplicación a edificios instrumentados. La aplicación de las técnicas de identificación de sistemas a edificios instrumentados se ha incrementado en los últimos años gracias a los programas de instrumentación de tipo permanente en edificios en la gran mayoría de países con riesgo sísmico severo.

Uno de los trabajos pioneros en esta línea de investigación fue el desarrollado por Beck y Jennings (1980), en donde se propone un método para la estimación de parámetros modales, en lugar de la estimación explícita de valores de coeficientes de rigidez y amortiguamiento. En esa investigación se propone un método llamado *minimización modal*, por medio del cual es posible definir secuencialmente las características modales de frecuencias y amortiguamiento para los diferentes modos de vibrar de los sistemas. Dado que este método toma ventaja de la linealidad de las ecuaciones del modelo, sólo es aplicable para comportamiento lineal de los sistemas estudiados. La estrategia de minimización es iterativa. El método de minimización modal ha sido aplicado en un gran número de investigaciones reportadas en la literatura. Dentro de los trabajos más trascendentes y recientes destacan los desarrollados en una estructura de 5 niveles con aislamiento sísmico en la base (Papageorgiu y Lin, 1989), en una edificio de 14 niveles con un efecto pronunciado de interacción suelo-estructura (Papageorgiu y Lin, 1990) y en una estructura de mampostería con presencia de cuerpos anexos (Gentile, 1990).

Aplicación en la estimación del nivel de daño en edificios. Los sistemas estructurales de los edificios presentan acumulación de daño cada vez que son sometidos a excitaciones sísmicas e inclusive bajo cargas de servicio. Si este daño no es detectado y corregido puede causar potencialmente el colapso de una estructura. Lo anterior ha motivado el desarrollo de un gran número de investigaciones encaminadas a establecer criterios para la estimación de daño en sistemas estructurales; en gran parte de estas investigaciones se ha aplicado la metodología de identificación de sistemas para cumplir dicho objetivo.

Dado que los métodos y procedimientos deben contemplar el comportamiento histerético de las estructuras, la identificación de tales sistemas es por consiguiente un problema no lineal. El primer intento que se desarrolló fue el de aplicar las técnicas lineales pero segmentando la respuesta en n segmentos lineales y estimando los parámetros para cada segmento (Temura y Jennings, 1974). Sin embargo, estos métodos presentan la desventaja de que ignoran condiciones iniciales de segmento a segmento y que son una caracterización promedio de los parámetros por segmento. Dipasquale y Cakmak, (1990), utilizan este método para evaluar el daño sísmico en edificios.

Las aplicaciones más importantes relacionadas con modelos no lineales se basan en el uso de estrategias recursivas, para evaluar la variación de los parámetros en cada instante de tiempo. Dada la complejidad de los modelos matemáticos, en general el proceso de identificación se lleva a cabo en modelos equivalentes de un grado de libertad (Distefano y Rath, 1974; Udwardia y Jerath, 1980; Iwan y Cifuentes, 1986; Loh y Tsaur, 1988), en donde se proponen modelos histeréticos para caracterizar el comportamiento no lineal de los sistemas. Existen investigaciones recientes donde se estudia el comportamiento no lineal de sistemas de n grados de libertad (Lin, Soon y Natke, 1990); (Agabian et al, 1991).

Técnicas en el dominio de la frecuencia. Se han establecido métodos para identificar los

parámetros estructurales con base en el análisis en el dominio de la frecuencia de los registros sísmicos registrados en edificios (McVerry, 1980). La identificación paramétrica se realiza iterativamente con base en los espectros de Fourier de la respuesta registrada con los correspondientes del modelo matemático.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL EDIFICIO

2.1 El objetivo de la instrumentación sísmica

Los métodos de análisis y de diseño sísmico de edificios incluyen algunos parámetros cuyos valores no pueden justificarse por deducciones racionales inobjetable, sino que se han fijado de manera de producir resultados que concuerden con el desempeño observado de las construcciones sometidas a sismos severos. Por carecer de medidas cuantitativas de la excitación impuesta a los edificios y de la respuesta de los mismos, las conclusiones con respecto al desempeño de las construcciones son necesariamente subjetivas y, por tanto, sujetas a controversia. Este proceso de calibración de los métodos analíticos de diseño sólo podrá ser plenamente convincente cuando se base en una amplia comprobación cuantitativa de las acciones que realmente se imponen a los edificios y de la respuesta que estos experimentan, o sea, en el análisis de registros obtenidos de la instrumentación sísmica de una vasta gama de edificios. En años recientes se ha extendido enormemente la instrumentación sísmica del terreno, lo que ha permitido grandes avances en el conocimiento del movimiento que experimenta el terreno durante un sismo y de las grandes diferencias que tiene este movimiento por las condiciones locales de topografía y propiedades del subsuelo. Muy limitados han sido, por el contrario, los frutos que se han tenido de la instrumentación sísmica de edificios. En parte porque el esfuerzo dedicado a este aspecto ha sido mucho más limitado que el que se ha puesto en la medición del movimiento del terreno, y en parte porque la mayoría de los registros obtenidos son de movimientos de poca amplitud. Otros factores importantes son que en muchos casos no se contaba con información suficientemente detallada de las propiedades del edificio, como para elaborar modelos refinados de su respuesta, y que la instrumentación

era muy limitada para que pudiera describir en forma completa la respuesta estructural. La instrumentación sísmica de edificios y la interpretación de los registros de la respuesta ante sismos severos constituyen, probablemente, la línea más productiva de investigación para mejorar los métodos de diseño sismorresistente de edificios. Los movimientos sísmicos en la ciudad de México presentan características particulares que requieren ser estudiadas directamente en el sitio. El movimiento que experimenta el terreno durante un sismo es diferente del que se tiene en la mayoría de los otros sitios, por su gran duración y por su contenido de vibraciones de baja frecuencia. Por otra parte, la respuesta de edificios sobre los estratos de terreno compresible está fuertemente influida por la interacción del suelo y la estructura. Lamentablemente, en 1985 no pudo contarse con ningún registro de la respuesta sísmica de edificios, así que la interpretación del comportamiento de los sismos tuvo que basarse exclusivamente en la evaluación de los daños. A partir de esta fecha los esfuerzos de instrumentación se han enfocado principalmente al registro del movimiento del terreno. Esta instrumentación ha dado ya frutos extraordinarios, en cuanto a la comprensión de la amplificación de las ondas sísmicas en el valle de México y de las diferencias de los movimientos que se presentan en los diferentes sitios por efecto de las condiciones del subsuelo. Mucho más limitada ha sido la atención prestada a la instrumentación sísmica de edificios. Existe actualmente una decena de edificios instrumentados, lo cual es insuficiente, si se piensa en la gran variedad de tipos de estructuras y de condiciones de subsuelo y de cimentación para las cuales se requiere conocer el comportamiento.

El edificio Jalapa fué seleccionado, entre una serie de edificios, para ser instrumentado debido a las siguientes características: a) está localizado en la zona de máxima amplificación de las ondas sísmicas, b) tiene características dinámicas que conducen a una respuesta muy elevada, o sea, que el edificio tiene un periodo fundamental de vibración semejante al periodo predominante del terreno, c) es un tipo de construcción muy común en la ciudad de México, con estructura de concreto, con losa reticular y con cimentación de pilotes de fricción, d) es

una estructura sencilla, regular y simétrica para poder entender su respuesta estructural con el mínimo número de instrumentos, e) se cuenta con la documentación completa del proyecto estructural y existe facilidad de acceso y permiso para colocar instrumentos y operarlos (Meli, Murià y Quaas, 1993).

2.2 Descripción de la estructura

El edificio está compuesto por una estructura principal de 14 niveles con un apéndice y un cuerpo anexo de tres niveles, las cuales están unidos en la planta del sótano y separados, en los restantes niveles, por una junta constructiva de 15 cm de espesor. Los tres primeros niveles están destinados a estacionamiento y los demás a oficinas. El edificio se localiza en la zona de suelo blando de la ciudad de México, el espesor del suelo arcilloso es de 30 m y los depósitos profundos se encuentran a 38.5 m de profundidad (Ovando E., 1993).

En la figura 1 se muestra la planta tipo del edificio. La estructura del edificio es de concreto reforzado a base de marcos formados por columnas y losa reticular como sistema de piso; además cuenta con muros de concreto y mampostería. La planta tipo del cuarto al décimo cuarto nivel tiene forma rectangular de 20 m de ancho por 32.45 m de largo y las alturas de entrepiso son constantes de 3.15 m. Las plantas de estacionamiento abarcan el cuerpo anexo y sus dimensiones son de 20 por 40 m. Los estacionamientos están escalonados y comunicados entre sí por rampas. En la figura 2 se presenta una elevación del edificio.

Las resistencias nominales de concreto de las columnas y muros se determinaron a partir de pruebas no destructivas y de ensaye de núcleos extraídos de dichos elementos, los valores son: de 314 kg/cm² para los primeros siete niveles y de 272 kg/cm² para los restantes.

La cimentación está compuesta por un cajón de concreto reforzado desplantado a una

profundidad de 3.30 m, la cual se apoya sobre pilotes de fricción de sección triangular de 60 cm de lado y 28 m de longitud. Además hay diez pilotes, de forma cuadrada de 40 cm de lado y 26 m de longitud, entrelazados con los anteriores de tal manera que no están en contacto con el cajón de cimentación; el extremo superior se encuentra a una profundidad de 9 m.

Durante los sismos de septiembre de 1985 el edificio sufrió algunos daños en sus elementos estructurales y no estructurales, por lo tanto se restructuró reforzando las columnas interiores con un encamizado de concreto reforzado y construyendo muros de concreto reforzado en la dirección longitudinal, ubicados en las crujiás de los marcos 1 y 4 (Muría y Moreno, 1993)

2.3 Instrumentación sísmica

Este edificio cuenta con una red de 14 acelerógrafos, localizados como se muestra en la figura 3. Los puntos de medición se distribuyeron de la siguiente forma: uno en terreno libre a aproximadamente 50 m del edificio, dos en pozos profundos, cuatro en el sótano, dos en el nivel tres, dos en el nivel ocho y tres en la azotea.

Los instrumentos seleccionados fueron acelerógrafos autónomos digitales de estado sólido con sensores triaxiales internos, dos horizontales y uno vertical, interconectados todos en configuración maestro-esclavo. Esta instrumentación con equipos autónomos se prefirió sobre un sistema con registro centralizado, básicamente por razones de costo y para tener mayor confiabilidad de su funcionamiento (Quaas y Almora, 1993a).

Los equipos quedaron básicamente agrupados en tres ejes verticales: uno sobre la esquina suroeste, incluyendo los sensores de pozo, uno al centro del edificio y uno en la esquina noroeste. La orientación de los sensores se basó en dos ejes principales de referencia: L para la dirección longitudinal del edificio y T para la dirección transversal. El eje transversal tiene

una desviación de aproximadamente 15° respecto al Norte.

Los dos pozos con sensores profundos a 20 y 45 m de profundidad quedaron localizados dentro del área del edificio, mediante una perforación a través de su cimentación. Una vez hechos los barrenos, se insertaron ademes articulados de aluminio con ranuras-guía para los sensores.

La instrumentación se diseñó para proporcionar (Meli, Murià y Quaas, 1993):

- a) Un registro detallado de la vibración del edificio, incluyendo los efectos de torsión de los modos superiores de vibración y del comportamiento no lineal, en su caso.
- b) Una visión completa de la interacción suelo-estructura, incluyendo la traslación y el cabeceo de la base y el efecto de la presencia del edificio y de su cimentación en el movimiento del terreno.
- c) Datos sobre la amplificación de las ondas sísmicas desde los depósitos firmes profundos hacia la superficie.

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN MATEMÁTICA

En sistemas estructurales, un modelo matemático se puede construir a partir de condiciones de equilibrio, cinemática de las deformaciones y características constitutivas de los materiales. El modelo matemático puede procesarse con herramientas numéricas como: el método de las rigideces, el método de elemento finito, el método de diferencias finitas, etc.. Haciendo uso de datos experimentales, las técnicas de estimación de parámetros pueden ajustar los parámetros del modelo a fin de que éste represente de la mejor forma el comportamiento real de la estructura durante el evento evaluado. Dentro de los parámetros se pueden incluir las propiedades constitutivas, caracterizadas principalmente por la rigidez, la masa y el amortiguamiento.

En esta tesis se propone una estrategia para la estimación de parámetros en sistemas estructurales. Se formula un problema de estimación de parámetros como uno de minimización restringida de la diferencia entre la respuesta medida y la respuesta estimada a partir del modelo matemático.

El principal objetivo de este capítulo es describir la estrategia de estimación de parámetros y derivar las relaciones requeridas para los algoritmos propuestos. En capítulos subsecuentes se hará referencia a estas relaciones. Se consideró un planteamiento de estado de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento dinámico de los sistemas, considerando como invariantes en el tiempo a los parámetros de los modelos.

3.1 Descripción del programa de computadora utilizado

La identificación de los modelos a partir de los resultados obtenidos de éstos, involucra un criterio para la toma de decisiones por parte de las personas que tratan de encontrar el modelo apropiado, así como un soporte apropiado de programas de computadora para apoyar dichas decisiones. El usuario comúnmente tiene que realizar una gran cantidad de iteraciones en el proceso de obtener el modelo definitivo, en el cual, a cada momento, se revisa este criterio. Así, los programas interactivos constituyen una herramienta práctica para llevar a cabo la identificación de parámetros, además de que engloban en una forma conveniente la extensa teoría matemática, haciéndola más accesible al usuario.

En este trabajo se eligió como ambiente el paquete de computadora denominado MATLAB (Matlab, 1985), el cual desarrolla esta teoría con la profundidad requerida. Este programa es de uso general y tiene una serie de librerías especializadas para resolver problemas de control (control toolbox) y de identificación de sistemas (system identification toolbox). En esta investigación se desarrollaron una serie de subrutinas para cada uno de los diferentes modelos matemáticos propuestos, en las cuales se especifican las relaciones que presentan los parámetros con base en el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio de los sistemas. De esta forma se aprovechó la simetría en las matrices de rigidez y amortiguamiento disminuyendo significativamente el número de parámetros a evaluar. La subrutina de minimización que utiliza el programa se basa en el método de Gauss-Newton modificado.

3.2 Representaciones de estado

El programa utilizado requiere de un planteamiento de estado de las ecuaciones de equilibrio, el cual es una forma común de describir sistemas lineales. Una descripción amplia del planteamiento de estado se puede encontrar en Decarlo, 1989 y Ljung, 1989. En el

planteamiento de estado las relaciones entre las señales de entrada, ruido y salida se definen como un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden o ecuaciones en diferencias, usando un vector auxiliar de estado (Ljung, 1989). Para la mayoría de los sistemas físicos es mas simple construir los modelos matemáticos con un planteamiento continuo en el tiempo, simplemente porque la mayoría de las leyes físicas (leyes del movimiento de Newton, relaciones en circuitos eléctricos, etc.) se expresan de esta forma. Esto significa que el modelo adquiere una representación

$$\dot{x}(t) = F(\beta)x(t) + G(\beta)u(t)$$

Donde F y G son matrices con dimensiones apropiadas ($n \times n$ y $n \times m$, respectivamente, para un estado n-dimensional y una entrada m-dimensional); $x(t)$ es el vector de estado y $u(t)$ es la variable de entrada en el tiempo t. En este planteamiento β es un vector de parámetros que típicamente corresponde a coeficientes físicos de valores desconocidos (en nuestra investigación, valores de rigidez y amortiguamiento). Dentro del planteamiento de estado, las variables del vector de estado tienen un significado físico (desplazamiento, velocidad, etc.), de tal forma que la información experimental proporcione los valores reales de las variables. En nuestra investigación, la información experimental consiste fundamentalmente en registros de aceleración absoluta, por lo que fue necesario utilizar programas que realizaran integración numérica a fin de obtener velocidades y desplazamientos del sistema real.

3.3 El método β de Newmark

Una vez que se han identificado los parámetros de rigidez y amortiguamiento, el paso siguiente consiste en calcular la respuesta teórica en desplazamiento, velocidad y aceleración; para ello, se usó un programa de análisis paso a paso con el algoritmo β de Newmark (Newmark, 1959).

El algoritmo β de Newmark es un método de integración directa, la integración se logra usando un procedimiento numérico paso a paso, y se llama *directa* porque no se hace una transformación de las ecuaciones de equilibrio a una forma distinta. En los métodos de integración directa se aplica una función excitadora que depende del tiempo y se calcula la historia de respuesta de la estructura durante el tiempo que dura la excitación.

Los métodos de integración directa se fundamentan en dos ideas: primero, en vez de tratar de satisfacer las ecuaciones de equilibrio en cualquier tiempo t , se busca satisfacerlas únicamente a intervalos de tiempo discretos Δt ; esto es, se busca el equilibrio, involucrando el efecto de las fuerzas de inercia, de amortiguamiento y elásticas, en puntos discretos de tiempo, dentro del intervalo de solución. La segunda idea, es que se supone que ocurre una variación de desplazamientos, velocidades y aceleraciones en cada intervalo de tiempo Δt .

En el método β de Newmark los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración al inicio del intervalo de solución ($t=0$) son conocidos. La solución se requiere para un intervalo de tiempo que va desde cero hasta T . Este intervalo se subdivide en n intervalos de tiempo iguales ($\Delta t=T/n$), y el método proporcionará una solución para los tiempos $0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, t, t+\Delta t, \dots, T$. El algoritmo calcula la solución correspondiente al siguiente intervalo en base a las soluciones precedentes.

El metodo se basa en las siguientes expresiones para la velocidad y el desplazamiento final de cada intervalo

$$\{\dot{x}_{t+\Delta t}\} = \{\dot{x}_t\} + [(1 - \delta)\{\ddot{x}_{t+\Delta t}\}]\Delta t \quad (3.1)$$

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_t\} + \{\dot{x}_t\}\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha\right)\{\ddot{x}_t\} + \alpha\{\ddot{x}_{t+\Delta t}\}\right]\Delta t^2 \quad (3.2)$$

donde α y δ son parámetros que pueden ser ajustados para determinar la precisión de la integración. Originalmente, Newmark propuso que los valores de estos parámetros fueran $\alpha = 1/4$ y $\delta = 1/2$, con lo cual se supone que la aceleración varía en forma constante.

Asimismo, se satisfacen las ecuaciones de equilibrio de movimiento a un tiempo $t + \Delta t$, esto es

$$[M]\{\ddot{x}_{t+\Delta t}\} + [C]\{\dot{x}_{t+\Delta t}\} + [K]\{x_{t+\Delta t}\} = \{P_{t+\Delta t}\} \quad (3.3)$$

De las ecuaciones 3.1 y 3.2, se conocen las variables asociadas a un tiempo t , y las incógnitas son aquellas correspondientes a un tiempo $t + \Delta t$. De la ecuación 3.2 se puede obtener $\dot{x}_{t+\Delta t}$ en función de $x_{t+\Delta t}$, y sustituirla en la ecuación 3.1; de tal forma, considerando la ecuación resultante de esta sustitución y la ecuación 3.2, se tendrán ecuaciones para la aceleración y para la velocidad en función de los desplazamientos desconocidos únicamente.

Para obtener los desplazamientos, se sustituyen las dos relaciones anteriores en la ecuación de equilibrio 3.3; conociendo dichos desplazamientos sólo resta sustituirlos en las ecuaciones 3.1 y 3.2 para obtener las soluciones para la aceleración y la velocidad.

Los valores de las incógnitas así obtenidas pasan a ser los datos para resolver las aceleraciones, velocidades y desplazamientos para el paso siguiente, y así se prosigue con la sucesión de cálculos hasta completar el intervalo total de tiempo.

Para iniciar los cálculos del método β de Newmark, se requieren los siguientes datos:

- Las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura
- Los valores iniciales de los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento
- El intervalo de tiempo a lo largo del cual se calcularán las soluciones, así como el

valor de los incrementos de tiempo Δt

- Los valores de los parámetros α y δ , que deben satisfacer lo siguiente:

$$\delta \geq 0.5$$

$$\alpha \geq 0.25 (0.5 + \delta)^2$$

- Calcular las constantes de integración:

$$a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}$$

$$a_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}$$

$$a_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}$$

$$a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$$

$$a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1$$

$$a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right]$$

$$a_6 = \Delta t (1 - \delta)$$

$$a_7 = \delta \Delta t$$

- Formar la matriz de rigidez efectiva \hat{K}

$$[\hat{K}] = [K] + a_0[M] + a_1[C]$$

- Triangularizar la matriz \hat{K}

Con estos datos se procede a hacer el análisis paso a paso; para cada incremento de tiempo se calcula:

1. El vector de cargas efectivas

$$\{\hat{P}_{t+\Delta t}\} = \{P_{t+\Delta t}\} + [M](a_0\{x_t\} + a_2\{\dot{x}_t\} + a_3\{\ddot{x}_t\}) + [C](a_1\{x_t\} + a_4\{\dot{x}_t\} + a_5\{\ddot{x}_t\})$$

2. Los desplazamientos

$$[\hat{K}]\{x_{t+\Delta t}\} = \{\hat{P}\}$$

3. Las aceleraciones y velocidades

$$\{\ddot{x}_{t+\Delta t}\} = a_0(\{x_{t+\Delta t}\} - \{x_t\}) - a_2\{\dot{x}_t\} - a_3\{\ddot{x}_t\}$$

$$\{\dot{x}_{t+\Delta t}\} = \{\dot{x}_t\} + a_6\{\ddot{x}_t\} + a_7\{\ddot{x}_{t+\Delta t}\}$$

3.4 Simulaciones de sistemas estructurales

Antes de utilizar los registros sísmicos para la estimación de parámetros en los dos edificios en estudio, se decidió llevar a cabo una serie de simulaciones matemáticas con modelos de diversa complejidad, con el fin de evaluar la eficiencia de los algoritmos propuestos.

En las simulaciones no se consideró la presencia del ruido en las señales, por lo que esta investigación se consideró con enfoque determinista del problema. Las simulaciones contemplaron los siguientes modelos:

- a) *Modelo de un grado de libertad (1GL)*, en donde se evalúan parámetros de rigidez y amortiguamiento del sistema. En esta simulación se analiza la importancia de proporcionar valores iniciales de los parámetros para lograr una convergencia expedita
- b) *Modelo de dos grados de libertad (2GL)*, se evalúan cuatro parámetros estructurales (dos

de rigidez y dos de amortiguamiento), y se analiza la importancia de aprovechar la simetría de las matrices y las relaciones entre los parámetros

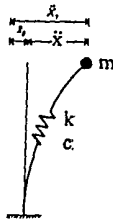
- c) *Modelo de tres grados de libertad (3GL)*, con un grado de libertad asociado a la estructura y dos grados relacionados con los efectos de interacción suelo-estructura, uno para el movimiento de traslación de la base y otro para el cabeceo de la cimentación. Se estudia la influencia de contar con la información completa en todos los grados de libertad en la estimación de los parámetros
- d) *Modelo de cinco grados de libertad (5GL)*, con tres grados de libertad relacionados con la estructura y dos con el efecto de interacción suelo-estructura (ISE).

La metodología empleada en las simulaciones fue la siguiente:

1. Se propusieron valores a los parámetros que gobiernan el comportamiento dinámico (caracterizado por constantes de rigidez, amortiguamiento y masa)
2. Se calcularon las respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración para cada uno de los grados de libertad del modelo, mediante un programa de análisis paso a paso con el algoritmo β de Newmark
3. Con la señal de excitación y con las respuestas de los modelos, se identificaron los parámetros mediante los algoritmos propuestos

3.4.1 Modelo de un grado de libertad

Se realizó la simulación de un modelo de un grado de libertad donde los parámetros a evaluar son las constantes de rigidez (k) y de amortiguamiento (c). En esta simulación se da por conocido el valor de la masa (m), la excitación \ddot{x}_g (entrada del sistema) y la respuesta del modelo en desplazamiento, velocidad \dot{y} y aceleración \ddot{y} . La ecuación de equilibrio se define como:



$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g$$

Si se plantea la ecuación mediante un planteamiento de estado con variables

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

La ecuación de equilibrio en función de las variables de estado queda descrita como

$$m\dot{x}_2 + cx_2 + kx_1 = -m\ddot{x}_g$$

o en la forma matricial

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Los valores propuestos para los parámetros en esta simulación son

$$M = 10 \text{ t s}^2 / \text{m}$$

$$K = 1000 \text{ t/m}$$

$$C = 1\% \quad C_{cr} = 2 \text{ t s/m}$$

Se utilizó el método β de Newmark para determinar la respuesta teórica en desplazamiento, velocidad y aceleración.

Por lo que los parámetros a evaluar son

$$\begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k/m \\ -c/m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -100 \\ -0.20 \end{bmatrix}$$

donde $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_2$ son los parámetros teóricos.

A fin de analizar la importancia que tiene en la estimación de los parámetros el proponer valores iniciales cercanos a los teóricos, se propusieron dos conjuntos de valores iniciales

$$\text{Caso 1:} \quad \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} -90 \\ -0.30 \end{bmatrix}$$

$$\text{Caso 2:} \quad \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} -50 \\ -0.30 \end{bmatrix}$$

En ambos casos se logró la convergencia a los parámetros teóricos, con la diferencia que para el caso 1, el cual presenta un valor del parámetro $\hat{\beta}_{10}$ cercano al teórico, el número de

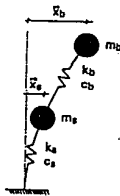
iteraciones fue de 4, mientras que para el caso 2 el número de iteraciones requeridas fue de 10. En las figura 4 se muestra la convergencia de los valores de los parámetros en los casos estudiados.

3.4.2 Modelo de dos grados de libertad

En esta simulación se considera la estimación de los parámetros de un sistema de dos grados de libertad, donde los parámetros a evaluar son dos valores de rigidez (k_b y k_s) y dos de amortiguamiento (c_b y c_s). Se dan por conocidos los valores de masa en los dos grados de libertad, la excitación en la base \ddot{x}_g y las respuestas teóricas de desplazamiento, velocidad y aceleración en cada grado de libertad. La ecuación de movimiento del sistema queda descrita en forma matricial como

$$\begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & -c_b \\ -c_b & (c_b + c_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & -k_b \\ -k_b & (k_b + k_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ x_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_b \\ m_s \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

Si se aceptan las siguientes variables de estado



$$\begin{aligned} x_1 &= x_b \\ x_2 &= x_s \\ x_3 &= \dot{x}_1 = \dot{x}_b \\ x_4 &= \dot{x}_2 = \dot{x}_s \end{aligned}$$

la ecuación de equilibrio queda descrita en forma matricial mediante el siguiente planteamiento de estado

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_b}{m_b} & \frac{k_b}{m_b} & -\frac{c_b}{m_b} & \frac{c_b}{m_b} \\ \frac{k_b}{m_s} & -\frac{k_b+k_s}{m_s} & \frac{c_b}{m_s} & -\frac{c_b+c_s}{m_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

Los valores reales de esta simulación son los siguientes:

$$m_b = 10 \text{ t s}^2 / \text{m} ; k_b = 1000 \text{ t/m} ; c_b = 2 \text{ t s/m}$$

$$m_s = 25 \text{ t s}^2 / \text{m} ; k_s = 3000 \text{ t/m} ; c_s = 58.09 \text{ t s/m}$$

Se calculó la respuesta real de este sistema utilizando un programa de integración numérica con base en el planteamiento β de Newmark. La señal utilizada como excitación en la base del modelo fue uno de los sismos registrados en el terreno de la Secundaria No. 3. Con la señal de entrada al sistema y con la respuesta teórica se realizó la identificación de los parámetros de rigidez y amortiguamiento del sistema. Se estudiaron dos casos, a fin de evaluar la importancia de aprovechar la simetría de las matrices de rigidez y amortiguamiento, así como las relaciones entre las constantes en el planteamiento de estado. Los casos estudiados fueron:

Caso 1. Se consideran como parámetros a identificar a las ocho variables de la matriz en el planteamiento de estado. El programa identifica las variables sin existir ninguna relación entre ellas, al considerarlas independientes. Es decir, los parámetros a evaluar son:

$$\begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \hat{\beta}_4 \\ \hat{\beta}_5 \\ \hat{\beta}_6 \\ \hat{\beta}_7 \\ \hat{\beta}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_b / m_b \\ k_b / m_b \\ -c_b / m_b \\ c_b / m_b \\ k_b / m_s \\ -(k_b + k_s) / m_s \\ c_b / m_s \\ -(c_b + c_s) / m_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -100 \\ 100 \\ -0.2 \\ 0.2 \\ 40 \\ -160 \\ 0.08 \\ -2.4 \end{bmatrix}$$

Caso 2. Se considera que sólo existen cuatro variables a identificar; k_b , c_b , k_s , c_s . En este caso, por lo tanto, se toma en cuenta la relación que guardan entre sí estas variables, para lo cual fue necesario desarrollar una subrutina adicional con el fin de establecer estas relaciones. Es decir, los parámetros a evaluar son

$$\begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \hat{\beta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_b / m_b \\ c_b / m_b \\ (k_b + k_s) / m_s \\ (c_b + c_s) / m_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -100 \\ -0.20 \\ -160 \\ -2.4 \end{bmatrix}$$

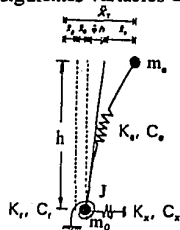
Se realizó el proceso de estimación de parámetros de los dos casos mencionados, obteniéndose los valores que se muestran en la tabla 1. Se aprecia que al liberar los ocho parámetros en el caso 1, se encuentran diferencias significativas entre los valores estimados y los reales. Para el caso 2, las diferencias en rigidez fueron menores al 0.3 por ciento, y en amortiguamiento inferiores al 10 por ciento, lo que se considera satisfactorio.

3.4.3 Modelo de tres grados de libertad

En este ejemplo se considera la identificación de un sistema estructural de tres grados de libertad, con el cual se simula el efecto de interacción suelo-estructura. Este sistema queda definido por las siguientes ecuaciones de movimiento:

$$\begin{bmatrix} m_e & 0 & 0 \\ 0 & m_0 & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_e & -c_e & -c_e h \\ -c_e & (c_x + c_e) & c_e h \\ -c_e h & c_e h & (c_r + c_e h^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_e & -k_e & -k_e h \\ -k_e & (k_x + k_e) & k_e h \\ -k_e h & k_e h & (k_r + k_e h^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_0 \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \\ m_0 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

si se consideran las siguientes variables de estado



$$\begin{aligned} x_1 &= x \\ x_2 &= x_0 \\ x_3 &= \phi \\ x_4 &= \dot{x} \\ x_5 &= \dot{x}_0 \\ x_6 &= \dot{\phi} \end{aligned}$$

la ecuación de equilibrio queda descrita en forma matricial como

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_e}{m_e} & \frac{k_e}{m_e} & \frac{k_e h}{m_e} & -\frac{c_e}{m_e} & \frac{c_e}{m_e} & \frac{c_e h}{m_e} \\ \frac{k_e}{m_0} & -\frac{k_e + k_x}{m_0} & -\frac{k_e h}{m_0} & \frac{c_e}{m_0} & -\frac{c_x + c_e}{m_0} & -\frac{c_e h}{m_0} \\ \frac{k_e h}{J} & -\frac{k_e h}{J} & -\frac{k_r + k_e h^2}{J} & \frac{c_e h}{J} & -\frac{c_e h}{J} & -\frac{c_r + c_e h^2}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

los valores reales de esta simulación son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 m_e &= 10 \text{ t s}^2 / \text{m} & ; & & k_e &= 1000 \text{ t/m} & & ; & c_e &= 8 \text{ t s/m} \\
 m_o &= 2 \text{ t s}^2 / \text{m} & ; & & k_x &= 500 \text{ t/m} & & ; & c_x &= 9.50 \text{ t s/m} \\
 J &= 30 \text{ t ms}^2 & ; & & k_r &= 4000 \text{ t m/rad} & & ; & c_r &= 139 \text{ t m s/rad}
 \end{aligned}$$

Se calculó la respuesta real de este sistema utilizando como excitación en la base del modelo uno de los sismos registrados en el terreno de la Secundaria No. 3. Con la señal de entrada al sistema y con la respuesta teórica se realizó la estimación de los parámetros de rigidez y amortiguamiento del sistema, con parámetros de masa conocidos. Se considera que sólo existen seis variables a identificar: k_e , c_e , k_x , c_x , k_r , c_r . En este caso, por lo tanto, se toma en cuenta la relación que guardan entre sí estas variables, por lo que el vector de parámetros es el siguiente

$$\begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \hat{\beta}_4 \\ \hat{\beta}_5 \\ \hat{\beta}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_e \\ c_e \\ k_x \\ c_x \\ k_r \\ c_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 8 \\ 500 \\ 9.5 \\ 4000 \\ 139 \end{bmatrix}$$

Se estudiaron tres casos, a fin de evaluar la importancia de contar en cada grado de libertad con la respuesta del sistema original. Los casos son:

- Caso 1. Se conoce la respuesta de desplazamiento y velocidad en los tres grados de libertad
- Caso 2. Se conoce la respuesta de desplazamiento y velocidad en la estructura y en la traslación de la base, desconociendo la respuesta en rotación de la base
- Caso 3. Se conoce la respuesta solo en la estructura, sin contar con la respuesta asociada a los efectos de ISE

Se estimaron los parámetros para cada uno de los casos estudiados, obteniéndose los valores que se presentan en la tabla 2. En la tabla se aprecia que al conocer la respuesta en los 3 grados de libertad, la estimación en los valores de los parámetros es muy satisfactoria; sin embargo, como se aprecia en los casos 2 y 3, el no contar con la respuesta en alguno de los grados de libertad, puede ocasionar diferencias significativas en los valores de los parámetros estimados.

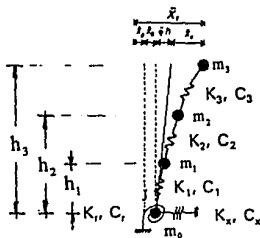
3.4.4 Modelo de cinco grados de libertad

Se realizó un estudio de simulación con un modelo matemático de cinco grados de libertad, con tres grados de libertad asociados a la estructura y dos grados de libertad relacionados con un posible efecto de interacción suelo-estructura, compuesto por un movimiento traslacional de la base y por una rotación de la base debida al cabeceo. En este modelo existen diez parámetros a evaluar, cinco de ellos relacionados con coeficientes de rigidez (k_1 , k_2 , k_3 , k_x , k_r) y cinco asociados a coeficientes de amortiguamiento (c_1 , c_2 , c_3 , c_x , c_r). Al igual que las simulaciones anteriormente descritas, se consideran conocidos los valores de las masas de cada grado de libertad, la excitación en la base \ddot{x}_g y las respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración. Para este modelo las ecuaciones de equilibrio dinámico quedan descritas, en forma matricial, de la forma

$$\begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{e3} \\ X_{e2} \\ X_{e1} \\ X_0 \\ \varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_2 & -c_2 & 0 & 0 & -c_2(h_2 - h_1) \\ -c_2 & c_2 + c_1 & -c_1 & 0 & c_2(h_2 - h_1) \\ 0 & -c_1 & c_1 + c_1 & -c_1 & -c_1(h_2 - h_1) \\ 0 & 0 & -c_1 & c_1 + c_1 & -c_1 h_1 \\ 0 & 0 & -c_1 & c_1 + c_1 & c_1 h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_{e3} \\ \dot{X}_{e2} \\ \dot{X}_{e1} \\ \dot{X}_0 \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_2(h_2 - h_1) & c_2(h_2 - h_1) & -c_1(h_2 - h_1) & c_1 h_1 & c_1 + \sum_{i=1}^2 c_i(h_1 - h_{i-1})^2 \\ -c_2(h_2 - h_1) & -c_2(h_2 - h_1) & -c_1 h_1 & c_1 h_1 & \sum_{i=1}^2 c_i(h_1 - h_{i-1})^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{e3} \\ X_{e2} \\ X_{e1} \\ X_0 \\ \varphi \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 & 0 & 0 & -k_2(h_2 - h_1) \\ -k_2 & k_2 + k_1 & -k_1 & 0 & k_2(h_2 - h_1) \\ 0 & -k_1 & k_1 + k_1 & -k_1 & -k_1(h_2 - h_1) \\ 0 & 0 & -k_1 & k_1 + k_1 & -k_1 h_1 \\ -k_2(h_2 - h_1) & k_2(h_2 - h_1) & k_1(h_2 - h_1) & k_1 h_1 & k_1 + \sum_{i=1}^2 k_i(h_1 - h_{i-1})^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{e3} \\ X_{e2} \\ X_{e1} \\ X_0 \\ \varphi \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_3 \\ m_2 \\ m_1 \\ m_0 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{X}_0$$

Si se consideran las siguientes variables de estado:



- $X_1 = X_{e1}$
- $X_2 = X_{e2}$
- $X_3 = X_{e3}$
- $X_4 = X_0$
- $X_5 = \varphi$
- $X_6 = \dot{X}_{e1}$
- $X_7 = \dot{X}_{e2}$
- $X_8 = \dot{X}_{e3}$
- $X_9 = \dot{X}_0$
- $X_{10} = \dot{\varphi}$

La ecuación de equilibrio dinámico puede escribirse mediante el siguiente planteamiento de

estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & 0 & 0 & \frac{k_1 \Delta_1}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} & 0 & 0 & \frac{c_1 \Delta_1}{m_1} \\ \frac{k_1}{m_2} & -\frac{k_1+k_2}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & 0 & \frac{-k_1 \Delta_1 + k_2 \Delta_2}{m_2} & \frac{c_1}{m_2} & -\frac{c_1+c_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & 0 & \frac{-c_1 \Delta_1 + c_2 \Delta_2}{m_2} \\ 0 & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{k_2+k_1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & \frac{-k_2 \Delta_1 + k_1 \Delta_2}{m_1} & 0 & \frac{c_1}{m_1} & -\frac{c_1+c_2}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} & \frac{-c_2 \Delta_2 + c_1 \Delta_1}{m_1} \\ 0 & 0 & \frac{k_1}{m_3} & \frac{k_1+k_2}{m_3} & \frac{-k_1 \Delta_1}{m_3} & 0 & 0 & \frac{c_1}{m_3} & -\frac{c_1+c_2}{m_3} & \frac{c_2 \Delta_1}{m_3} \\ \frac{k_1 \Delta_1}{J} & \frac{k_1 \Delta_1 + k_2 \Delta_2}{J} & \frac{-k_2 \Delta_2 + k_1 \Delta_1}{J} & \frac{-k_1 \Delta_1}{J} & \frac{k_1 + \sum_{i=1}^n k_i \Delta_i^2}{J} & \frac{c_1 \Delta_1}{J} & \frac{c_1 \Delta_1 + c_2 \Delta_2}{J} & \frac{-c_1 \Delta_2 + c_2 \Delta_1}{J} & \frac{c_2 \Delta_1}{J} & \frac{c_1 + \sum_{i=1}^n c_i \Delta_i^2}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

donde

$$\begin{aligned}
 \Delta_3 &= h_3 - h_2 \\
 \Delta_2 &= h_2 - h_1 \\
 \Delta_1 &= h_1
 \end{aligned}$$

Los valores propuestos para los parámetros en esta simulación son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 m_3 &= 10 \text{ t s}^2 / \text{m} & ; & & k_3 &= 1000 \text{ t} / \text{m} & & ; & c_3 &= 4.24 \text{ t s} / \text{m} \\
 m_2 &= 12 \text{ t s}^2 / \text{m} & ; & & k_2 &= 1500 \text{ t} / \text{m} & & ; & c_2 &= 6.91 \text{ t s} / \text{m} \\
 m_1 &= 15 \text{ t s}^2 / \text{m} & ; & & k_1 &= 2000 \text{ t} / \text{m} & & ; & c_1 &= 9.16 \text{ t s} / \text{m} \\
 m_x &= 20 \text{ t s}^2 / \text{m} & ; & & k_x &= 3500 \text{ t} / \text{m} & & ; & c_x &= 52.92 \text{ t s} / \text{m} \\
 J &= 400 \text{ t ms}^2 & ; & & k_r &= 12000 \text{ t m} / \text{rad} & & ; & c_r &= 876.36 \text{ t m s} / \text{rad}
 \end{aligned}$$

A fin de analizar la importancia de contar con información de la respuesta en los grados de libertad considerados en la estimación de los parámetros del sistema, así como de escalar los parámetros para que tengan valores del mismo orden de magnitud, se estudiaron cuatro casos en la simulación:

- Caso 1: Se conocen todas las respuestas de los grados de libertad considerados
- Caso 2: Se conoce la respuesta de todos los grados de libertad a excepción de la asociada al giro por cabeceo de la base. Este caso representaría a un edificio con efecto ISE instrumentado en tres niveles y un solo acelerógrafo en el sótano
- Caso 3: Se conocen exclusivamente las respuestas de los grados de libertad relacionados con la estructura. Este caso representaría al edificio mencionado en el caso 2 pero sin contar con instrumentación en el sótano del edificio.
- Caso 4: Presenta las mismas condiciones del caso 1, pero en el algoritmo de ajuste, se escalan las variables de tal forma que los parámetros a evaluar tengan valores del mismo orden de magnitud.

Se realizó la estimación de los parámetros para los cuatro casos, obteniéndose los valores que se presentan en la tabla 3. Analizando el caso 1, se aprecia una muy buena estimación de los parámetros de rigidez con diferencias respecto a los valores reales inferiores al 1 por ciento y con diferencias cercanas al 10 por ciento en los parámetros relacionados con el amortiguamiento. En los casos 2 y 3 se aprecia que conforme es menor la información experimental, se incrementa el nivel de error en la estimación de los parámetros; sin embargo, el hecho de contar con tres grados de libertad en la estructura ayuda a controlar el margen de error, lo que no sucede en la simulación del sistema de tres grados de libertad, donde el desconocer la respuesta en los grados de libertad asociados al efecto ISE provoca errores significativos en la estimación de los parámetros. El caso 4 muestra que el escalar las variables mejora la estimación de los parámetros, en particular los relacionados con el amortiguamiento.

CAPÍTULO 4

INTERPRETACIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS

4.1 Sismos registrados

El 15 de mayo de 1993 (14 de mayo hora local) ocurrieron dos temblores moderados frente a las costas de Oaxaca con una magnitud de $M=5.8$ y $M=6.0$ (denominados en este trabajo como sismo 1 y sismo 2 respectivamente). Aunque los movimientos fueron de poca intensidad, produjeron suficiente amplitud de aceleración para disparar la red de acelerógrafos del edificio. La duración del primer evento fue de casi un minuto y medio y la del segundo cercano a dos minutos (Quaas y Almora, 1993b).

En las figs 5 y 6 se muestran los acelerogramas registrados durante el primer evento y los espectros de Fourier asociados a los mismos, en los diferentes niveles de la estructura donde se cuenta con aparatos de registro, para las direcciones T y L, respectivamente. En las figuras se detecta que existe una amplificación de la aceleración conforme al nivel de ubicación del aparato. La aceleración máxima registrada en campo libre es de aproximadamente 4 cm/s^2 mientras que en la azotea fluctúa alrededor de 10 cm/s^2 . En los espectros de Fourier de la señal en campo libre se aprecia una cresta alrededor de 0.5 Hz, que es la frecuencia natural del sitio donde se ubica el edificio. En el espectro de Fourier de azotea para ambas direcciones, se detecta que la estructura amplifica la señal en la frecuencia propia del terreno; sin embargo, como era de esperarse, la amplificación mayor ocurre en las frecuencias propias de vibrar en cada una de las direcciones mencionadas, es decir, alrededor de 0.4 Hz para la dirección T y 0.7 Hz para la dirección L.

La identificación de las frecuencias naturales de vibrar del edificio en las dos direcciones de

análisis quedan más claramente definidas al calcular las funciones de transferencia entre la azotea y terreno.

4.2 Funciones de transferencia

Se calcularon las funciones de transferencia entre los espectros de Fourier de las señales de azotea y los de terreno, a fin de establecer las frecuencias naturales de vibrar del edificio en las dos direcciones de análisis. Si se acepta que la aceleración absoluta de azotea queda compuesta por los siguientes componentes (ver fig 7)

$$\ddot{x}_T = \ddot{x}_g + \ddot{x}_0 + \ddot{\varphi} h + \ddot{x}_e \quad (5.1)$$

- donde \ddot{x}_T aceleración absoluta en azotea
 \ddot{x}_g aceleración en campo libre
 \ddot{x}_0 aceleración en la base de la estructura
 $\ddot{\varphi}$ aceleración angular en la base de la estructura por cabeceo
h altura del nivel de azotea con respecto a la base
 \ddot{x}_e aceleración por deformación de estructura

Es posible entonces calcular la función de transferencia entre el espectro de Fourier de la señal de aceleración absoluta en azotea y el espectro de Fourier de la señal de aceleración en el terreno, el cual presenta una cresta máxima en la frecuencia natural de vibrar del sistema suelo-estructura, con valores de 0.37 Hz y 0.65 Hz para las direcciones T y L, respectivamente, durante el sismo 1, como se aprecia en las funciones trazadas con línea continua en la fig 8. Si se calcula la función de transferencia entre el espectro de Fourier de la señal de aceleración absoluta en azotea y el espectro de Fourier de la suma de las primeras tres componentes de aceleración ($\ddot{x}_g + \ddot{x}_0 + \ddot{\varphi} h$) de la ecuación (5.1), se presenta una cresta

máxima en la frecuencia natural de vibrar de la estructura como si esta estuviera empotrada en su base, la cual se representa con una línea punteada en la fig 8, con valores de 0.43 Hz en la dirección T y 0.76 Hz en la dirección L. Al analizar las funciones de transferencia obtenidas durante el sismo 1, se aprecia que el efecto de interacción suelo-estructura es poco significativo en la modificación de la frecuencia fundamental de la estructura empotrada con respecto a la del sistema global suelo-estructura, con disminuciones en frecuencia alrededor del 15 por ciento en ambas direcciones.

En las figuras 9 y 10 se muestra como se descomponen los desplazamientos y velocidades relativos de azotea ($x_T - x_g$; $\dot{x}_T - \dot{x}_g$), en las componentes de deformación de estructura, por traslación horizontal de la base y por el efecto de rotación o cabeceo de la base. En las figuras se aprecia que tanto para desplazamientos como para velocidades la componente con una participación mas significativa es la asociada a la deformación de la estructura, por lo que el efecto de interacción suelo-estructura no es significativo en el edificio, para este sismo.

4.3 Determinación de las frecuencias de vibrar

Con el fin de determinar las frecuencias naturales de vibrar del sistema suelo-estructura, para los modos de traslación, en sus dos direcciones; se calculó la función de transferencia entre el espectro de Fourier de la señal de aceleración absoluta en azotea y el espectro de Fourier de la señal de aceleración en el terreno para los dos eventos sísmicos registrados.

Por lo que toca a la determinación de las frecuencias naturales para los modos de torsión, éstas se obtienen de calcular la función de transferencia entre el espectro de Fourier de la señal en una esquina y el centro de la azotea.

En la tabla 4 se presenta un resumen de las frecuencias de traslación y de torsión del primer

modo, para los sismos registrados y para la prueba de vibración ambiental. Se puede apreciar que para los tres eventos registrados las frecuencias entre sí no sufren una modificación significativa; sin embargo, si se comparan con las determinadas de la prueba de vibración ambiental se observa que sí difieren relativamente.

CAPÍTULO 5

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

5.1 Estimación de parámetros

Para la estimación de los parámetros de rigidez y amortiguamiento del sistema estructural, para el primer sismo registrado y en las dos direcciones de análisis, se utilizaron tres modelos matemáticos:

- a) Sistema de 1 GL, por medio del cual es posible obtener coeficientes equivalentes de rigidez (k_e) y amortiguamiento (c_e) del sistema, utilizando como señal de entrada la registrada en terreno y como señal de salida la registrada en azotea. El número total de parámetros es de dos dado que se da por conocido el valor de la masa del sistema.
- b) Sistema de 3 GL, donde es posible estimar coeficientes de rigidez y amortiguamiento (k_e , c_e) asociados a la estructura y coeficientes relacionados con el efecto de traslación y cabeceo de la base. El número total de parámetros a evaluar es de seis, tres de ellos de rigidez y tres de amortiguamiento, con masas del sistema conocidas.
- c) Sistema de 5 GL, con tres grados de libertad de la estructura y dos al efecto ISE. Se estiman un total de 10 parámetros del sistema con seis parámetros relacionados con la estructura (k_1 , k_2 , k_3 , c_1 , c_2 y c_3) y cuatro relacionados con el efecto de interacción suelo-estructura (k_x , k_r , c_x y c_r), con masas del sistema conocidas.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la estimación de los parámetros para el sismo 1, exclusivamente.

5.1.1 Modelo de un grado de libertad

Se procedió a aplicar en el edificio las estrategias propuestas para la estimación de parámetros en el modelo de 1 GL, con el valor de masa del sistema conocido. Este valor de masa se estimó con las masas del sistema considerando todos los niveles de la estructura incluyendo el cajón de cimentación. Dada la importancia de proponer valores iniciales en los parámetros de rigidez y amortiguamiento lo más cercanos posibles a los valores reales, los valores iniciales se estimaron a partir de las frecuencias naturales de vibrar identificadas con las funciones de transferencia. Los parámetros iniciales considerados en la dirección transversal son

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} k_s \\ c_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 60 \\ 3 \end{bmatrix}$$

mientras que en la dirección longitudinal fueron propuestos los siguientes valores

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} k_s \\ c_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 170 \\ 4 \end{bmatrix}$$

Se realizó la estimación de los parámetros en las dos direcciones, considerando un registro de 80 s, es decir, 8000 puntos de análisis con un incremento en tiempo de 0.01 s. Los valores estimados fueron

$$\text{Dirección T: } \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}_{\min} = \begin{bmatrix} 57.58 \\ 1.77 \end{bmatrix}$$

$$\text{Dirección L: } \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}_{\min} = \begin{bmatrix} 155.97 \\ 2.65 \end{bmatrix}$$

A partir de estos parámetros es posible calcular las frecuencias fundamentales de vibrar del sistema, resultando

$$\text{Dirección T: } f_1 = 0.39 \text{ Hz}$$

$$\xi_1 = 0.038$$

$$\text{Dirección L: } f_1 = 0.65 \text{ Hz}$$

$$\xi_1 = 0.034$$

Tanto las frecuencias fundamentales de vibrar como los niveles de amortiguamiento calculados se asocian al sistema equivalente suelo-estructura. En las figs 11 y 12 se presenta la comparación de la respuesta registrada en la azotea (línea continua) y la calculada con los parámetros estimados (línea punteada) en la dirección T y dirección L, respectivamente. En las figuras se aprecia en general una buena correlación entre las respuestas.

5.1.2 Modelo de tres grados de libertad

Se realizó la estimación de parámetros en el edificio pero considerando ahora un modelo de tres grados de libertad; uno relacionado con la estructura y los dos restantes con el efecto de interacción suelo-estructura. Se estimaron seis parámetros (tres de rigidez y tres de amortiguamiento), considerando los valores de masa como conocidos. El valor de masa de la estructura se estimó como la suma de todas las masas de los niveles, con una altura equivalente del 70 por ciento de la altura total. Los valores de masa traslacional y rotacional de la cimentación se estimaron a partir de la geometría y masa existente de la cimentación.

Los parámetros iniciales se propusieron considerando las frecuencias naturales de vibrar y los niveles de amortiguamiento del sistema equivalente de un grado de libertad descrito

anteriormente. Los valores de k_x y k_r se calcularon con la geometría de la cimentación y las características del módulo de rigidez al cortante del suelo (G). Una vez que se han propuesto k_x y k_r , y conocidos los valores de masa en los tres grados de libertad y la frecuencia natural de vibrar, se encuentra el valor inicial de k_e . De forma análoga, se estimaron los valores iniciales de los parámetros de amortiguamiento. El vector de parámetros inicial fue el siguiente

$$\begin{array}{l} \text{Dirección T :} \\ \left[\begin{array}{c} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \\ \beta_6 \end{array} \right]_0 = \left[\begin{array}{c} k_e \\ c_e \\ k_x \\ c_x \\ k_r \\ c_r \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 199 \\ 1.58 \\ 571 \\ 6.00 \\ 1.16E09 \\ 8613 \end{array} \right] \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Dirección L :} \\ \left[\begin{array}{c} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \\ \beta_6 \end{array} \right]_0 = \left[\begin{array}{c} k_e \\ c_e \\ k_x \\ c_x \\ k_r \\ c_r \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 699 \\ 3.00 \\ 571 \\ 6.00 \\ 2.36E09 \\ 12282 \end{array} \right] \end{array}$$

Debido a que los órdenes de magnitud de los diferentes parámetros a evaluar son muy diferentes, se escalaron estos de tal forma que guardaran un mismo orden de magnitud. Esto se realizó de las dos subrutinas desarrolladas para este modelo de tres grados de libertad.

La estrategia que se siguió para la estimación de los parámetros fue la siguiente

- a) Dado que el comportamiento de la estructura fue prácticamente lineal durante el evento sísmico evaluado (lo que se comprobó con el sistema equivalente de un grado de libertad), se decidió utilizar la cuarta parte de los puntos del registro, es decir, los primeros 20 s (2000 ptos. ; $\Delta t=0.01$ s).
- b) En la primera estimación se fijaron los valores de amortiguamiento y se liberaron los

valores de rigidez, de tal forma que el número de parámetros fue de tres. De esta forma el ajuste se efectúa exclusivamente en las frecuencias naturales de vibrar.

- c) Una vez estimados los parámetros de rigidez, se fijan estos y se liberan los parámetros de amortiguamiento, por lo que de nuevo el número de parámetros a evaluar es de tres. En este paso el ajuste se concentra en las amplitudes de las señales.
- d) Con los valores de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento de ésta primera estimación, se liberan los seis parámetros para estimarse simultáneamente.
- e) Una vez estimados los parámetros se realiza de nuevo la estimación, pero ahora considerando el registro completo.

Siguiendo la estrategia descrita, fue posible encontrar los parámetros que minimizan el error, con los siguientes resultados.

$$\text{Dirección T : } \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \\ \beta_6 \end{bmatrix}_{\min} = \begin{bmatrix} 53.91 \\ 1.43 \\ 662.5 \\ 107 \\ 8.634\text{E}09 \\ 5.67\text{E}07 \end{bmatrix}$$

$$\text{Dirección L : } \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \\ \beta_6 \end{bmatrix}_{\min} = \begin{bmatrix} 172 \\ 3.54 \\ 1380 \\ 103 \\ 9.8\text{E}09 \\ 3.16\text{E}07 \end{bmatrix}$$

Estimados los parámetros de rigidez y amortiguamiento, es posible entonces calcular las frecuencias naturales de vibrar y las fracciones de amortiguamiento crítico del sistema en sus dos direcciones de análisis. Los resultados son

$$\begin{aligned} \text{Dirección T: } f_1 &= 0.39 \text{ Hz} \quad , \quad \xi_1 = 0.036 \quad ; \quad f_e = 0.42 \text{ Hz} \quad , \quad \xi_e = 0.035 \\ f_2 &= 3.37 \text{ Hz} \\ f_3 &= 20.38 \text{ Hz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Dirección L: } f_1 &= 0.65 \text{ Hz} \quad , \quad \xi_1 = 0.034 \quad ; \quad f_e = 0.74 \text{ Hz} \quad , \quad \xi_e = 0.032 \\ f_2 &= 4.51 \text{ Hz} \\ f_3 &= 14.56 \text{ Hz} \end{aligned}$$

A partir de los parámetros de rigidez y amortiguamiento asociados a la estructura, se calculó la frecuencia de vibrar de la estructura con la condición de base fija, resultando los valores de $f_e=0.42$ Hz y $f_e=0.74$ Hz, en las direcciones transversal y longitudinal, respectivamente. Tanto las frecuencias del sistema que considera los efectos de interacción suelo-estructura, como la asociada a la estructura con base fija, concuerdan con las estimadas a partir de las funciones de transferencia anteriormente descritas. Con los parámetros estimados de amortiguamiento de la estructura se evaluó la fracción de amortiguamiento para el modo fundamental en ambas direcciones, resultando un valor de 3.5 y 3.2 % del amortiguamiento crítico.

En las figs 13 a 16 se presenta una comparación de las respuestas teóricas calculadas con los parámetros estimados y las obtenidas a partir de los registros sísmicos, en lo que se refiere a desplazamientos (fig 13), velocidades (fig 14), aceleraciones relativas (fig 15) y aceleraciones absolutas (fig 16). En las figuras se presenta la correlación de las respuestas en los tres grados de libertad considerados en el sistema. Se aprecia que el modelo matemático predice adecuadamente la respuesta en el grado de libertad asociado a la azotea de la estructura tanto en frecuencia como en amplitud del movimiento. La correlación de respuestas en los grados de libertad asociados a la cimentación presenta algunas discrepancias, fundamentalmente motivadas por la pequeña amplitud del movimiento de la cimentación con relación al que se

presenta en la azotea del edificio, debido a que el efecto de interacción suelo-estructura es poco significativo. El algoritmo de minimización utilizado pondera el error en todos los grados de libertad con el mismo coeficiente de peso; dado que es deseable ponderar con diferente peso el error en ciertos grados de libertad, se pretende modificar el algoritmo para que se considere dicho aspecto. De manera análoga, en las figs 17 a 20 se presenta la comparación de respuestas teóricas y experimentales para la dirección longitudinal, donde se detecta que son válidos los mismos comentarios y observaciones hechas para la dirección transversal.

5.1.3 Modelo de cinco grados de libertad

Con la instrumentación sísmica con que cuenta el edificio, en particular la presencia de instrumentos de registro en dos niveles intermedios, fue posible realizar la estimación de parámetros de un modelo de cinco grados de libertad, en el cual tres de ellos se relacionan con la estructura y los dos restantes con el efecto de traslación y cabeceo de la base del edificio. Cabe mencionar que en los dos niveles intermedios no se cuenta con la señal en el centro geométrico del edificio, por lo que, surgió la inquietud de conocer si los registros al centro y los localizados en las esquinas difieren significativamente, esto es, si la torsión es muy considerable. En las figuras 21 y 22 se realiza una comparación entre el acelerograma registrado en el centro geométrico del edificio respecto al calculado en el mismo sitio a partir de los registros en las esquinas del edificio, donde no se aprecian diferencias significativas. Debido a que en los niveles tres y ocho no se cuenta con registros sísmicos en el centro geométrico del edificio, estos se calcularon con los registros en las esquinas de dichos niveles

Este modelo contempla un comportamiento bidimensional de la estructura, por lo que se descarta un posible acoplamiento del movimiento en la dirección perpendicular a la analizada, así como del efecto de torsión. En este modelo se estiman un total de diez parámetros (cinco

de rigidez y cinco de amortiguamiento), en el cual se consideran los parámetros de masa como conocidos.

Los parámetros iniciales de los dos grados de libertad asociados al efecto de interacción suelo-estructura (k_x , k_r , c_x , c_r) se propusieron con los valores identificados en el modelo de tres grados de libertad. Los otros seis parámetros iniciales se propusieron a partir de una estimación preliminar de un modelo de tres grados de libertad sin efecto de interacción suelo-estructura y considerando una distribución uniforme de rigidez. Los parámetros iniciales fueron

$$\text{Dirección T : } \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \\ \beta_6 \\ \beta_7 \\ \beta_8 \\ \beta_9 \\ \beta_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_3 \\ c_3 \\ k_2 \\ c_1 \\ k_1 \\ c_1 \\ k_x \\ c_x \\ k_r \\ c_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 65 \\ 2.80 \\ 57 \\ 1.18 \\ 93 \\ 6.40 \\ 663 \\ 107 \\ 8.6E09 \\ 5.7E07 \end{bmatrix}$$

$$\text{Dirección L : } \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \\ \beta_6 \\ \beta_7 \\ \beta_8 \\ \beta_9 \\ \beta_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_3 \\ c_3 \\ k_2 \\ c_1 \\ k_1 \\ c_1 \\ k_x \\ c_x \\ k_r \\ c_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 185 \\ 8.00 \\ 163 \\ 3.40 \\ 260 \\ 18.00 \\ 1380 \\ 103 \\ 9.8E09 \\ 3.16E07 \end{bmatrix}$$

Con los siguientes valores de masa y alturas:

$$m_3 = 1.819 \text{ t s}^2/\text{cm} \quad h_3 = 4240 \text{ cm}$$

$$m_2 = 3.334 \text{ t s}^2/\text{cm} \quad h_2 = 2980 \text{ cm}$$

$$m_1 = 2.719 \text{ t s}^2/\text{cm} \quad h_1 = 1405 \text{ cm}$$

$$m_x = 1.592 \text{ t s}^2/\text{cm}$$

$$J = 530667 \text{ t cm s}^2/\text{rad} \quad (\text{dirección T}); \quad J = 1362762 \text{ t cm s}^2/\text{rad} \quad (\text{dirección L})$$

Con las subrutinas desarrolladas para este modelo, se escalan los valores de los parámetros de tal forma que durante el proceso de minimización las variables tuvieran un mismo orden de magnitud.

La estrategia seguida para la estimación de parámetros fue la misma que la descrita en el modelo de tres grados de libertad, es decir, con el criterio de fijar ciertos parámetros y liberar otros, de tal forma que la estimación final comprenda el número total de parámetros y el registro completo de las señales.

Los parámetros que minimizan el error del modelo propuesto son los siguientes

$$\begin{array}{l}
 \text{Dirección T :} \\
 \beta_1 \\
 \beta_2 \\
 \beta_3 \\
 \beta_4 \\
 \beta_5 \\
 \beta_6 \\
 \beta_7 \\
 \beta_8 \\
 \beta_9 \\
 \beta_{10} \text{ min}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 \left[\begin{array}{l}
 79 \\
 9.40 \\
 60 \\
 0.8 \\
 11.4 \\
 5.5 \\
 1220 \\
 280 \\
 5.8E09 \\
 2.05E07
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 \text{Dirección L :} \\
 \beta_1 \\
 \beta_2 \\
 \beta_3 \\
 \beta_4 \\
 \beta_5 \\
 \beta_6 \\
 \beta_7 \\
 \beta_8 \\
 \beta_9 \\
 \beta_{10} \text{ min}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 \left[\begin{array}{l}
 257 \\
 40.1 \\
 190 \\
 6.1 \\
 399 \\
 17.3 \\
 1801 \\
 321 \\
 8.69E09 \\
 1.24E08
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Con los parámetros de rigidez y amortiguamiento estimados es posible calcular las frecuencias naturales de vibrar y las fracciones de amortiguamiento crítico del sistema en las dos direcciones de análisis. Los resultados son

$$\begin{aligned}
 \text{Dirección T: } f_1 &= 0.39 \text{ Hz} & , & & \xi_1 &= 0.036 & ; & & f_{e1} &= 0.41 \text{ Hz} & , & & \xi_{e1} &= 0.035 \\
 f_2 &= 1.18 \text{ Hz} & & & & & & & f_{e2} &= 1.20 \text{ Hz} \\
 f_3 &= 1.45 \text{ Hz} & & & & & & & f_{e3} &= 1.46 \text{ Hz} \\
 f_4 &= 4.61 \text{ Hz} \\
 f_5 &= 17.34 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Dirección L: } f_1 &= 0.66 \text{ Hz} & , & & \xi_1 &= 0.034 & ; & & f_{e1} &= 0.75 \text{ Hz} & , & & \xi_{e1} &= 0.032 \\
 f_2 &= 2.09 \text{ Hz} & & & & & & & f_{e2} &= 2.20 \text{ Hz} \\
 f_3 &= 2.59 \text{ Hz} & & & & & & & f_{e3} &= 2.65 \text{ Hz} \\
 f_4 &= 5.93 \text{ Hz} \\
 f_5 &= 13.91 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Las frecuencias de vibrar asociadas a la estructura (f_{e1} , f_{e2} y f_{e3}) se calculan con los parámetros de rigidez relacionados exclusivamente con la estructura y considerando que esta se encuentra empotrada en su base. Al analizar los resultados, se aprecia que la frecuencia del primer modo de vibrar del modelo de cinco grados de libertad en las dos direcciones concuerdan con los obtenidos en los modelos de uno y tres grados de libertad, solo que este modelo de cinco grados de libertad proporciona dos frecuencias adicionales relacionadas principalmente con el movimiento en modos superiores de la estructura.

En las figs 23 a 26 se muestra una comparación entre las respuestas calculadas con los parámetros estimados (líneas punteadas) y las obtenidas a partir de los registros sísmicos (líneas continuas), para la dirección transversal, en lo que se refiere a desplazamiento (fig 23), velocidad (fig 24), aceleración relativa (fig 25) y aceleración absoluta (fig 36). En las figuras se aprecia una muy buena correlación entre las respuestas, sobre todo en aquellas relacionadas con la estructura (azotea, nivel 8 y nivel 3). En la fig 36 se aprecia que en el nivel 3 se logra reproducir el movimiento para los modos superiores, aunque cualitativamente se aprecia que

dichos modos presentan mayor amortiguamiento que el real. De nuevo se aprecian problemas en la correlación de la respuesta con el grado de libertad relacionado con la traslación de la base. En las figs 27 a 30 se presenta la correlación de las respuestas para la dirección longitudinal, donde se aprecia una muy buena correlación entre las respuestas.

En la fig 31 se comparan las formas modales obtenidas con vibración ambiental (representadas en la fig con el símbolo □) y las calculadas a partir de los parámetros estimados para el sismo 1 (representadas con el símbolo ●). En la figura se aprecia que las formas modales son muy parecidas a pesar de que existen diferencias significativas en las frecuencias de vibrar obtenidas con ambos métodos, sobre todo para frecuencias superiores de vibrar. En ambas direcciones se detectan disminuciones en frecuencia del modo fundamental de alrededor del diez por ciento con respecto a las obtenidas con vibración ambiental.

5.5 Comentarios

Con los tres modelos estudiados (1 GL, 3 GL y 5 GL) fue posible reproducir la respuesta de azotea del edificio, así como definir los parámetros de rigidez y amortiguamiento que caracterizan el sistema estructural analizado; sin embargo, el modelo de cinco grados de libertad permitió identificar modos superiores de vibrar tanto del sistema suelo-estructura en sus conjunto, como los asociados a la estructura exclusivamente. En este edificio se observó que el efecto de interacción suelo-estructura no fue muy significativo en la respuesta global del sistema, ya que no se encontró una modificación significativa de la frecuencia de vibrar de la estructura con base fija con respecto a la que considera la flexibilidad en la base, ni un aumento apreciable en el amortiguamiento equivalente del sistema suelo-estructura.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se estableció una metodología para evaluar los parámetros que caracterizan el comportamiento lineal de la estructura del edificio Jalapa 15, con modelos de diversa complejidad matemática, incluyendo en ellos efectos relacionados con la interacción suelo-estructura.

En este edificio se llevó a cabo la estimación de los parámetros estructurales con modelos de 1, 3 y 5 grados de libertad, incorporando en los dos últimos el efecto ISE. Dentro de los principales resultados que se encontraron en el estudio destaca que el efecto ISE es poco significativo en la respuesta global del sistema, contrariamente a lo que se esperaba en un principio debido a que el cajón de cimentación que tiene el edificio se apoya sobre 54 pilotes de fricción. Se detectó, además, una variación de las frecuencias naturales de vibrar obtenidas con vibración ambiental, respecto a las que se presentaron durante los movimientos sísmicos.

Existen incertidumbres sobre si el cajón de cimentación presenta un comportamiento rígido durante los sismos, ya que al analizar los registros en el sótano se detectan movimientos diferenciales de consideración. Debido a que los modelos estudiados tienen como hipótesis el comportamiento rígido del cajón, no se descarta la posibilidad de que la flexibilidad del cajón pueda modificar los resultados obtenidos en la estimación paramétrica. Otro de los problemas detectados durante la estimación fue que debido a que el movimiento relativo del sótano es pequeño con respecto al de los niveles superiores del edificio, el algoritmo de identificación no pondera adecuadamente el error en la estimación, provocando discrepancias en la respuestas asociadas a ese grado de libertad.

Finalmente, se considera que el desarrollo de metodologías para la identificación de sistemas que consideren comportamiento lineal de estructuras puede proporcionar información muy importante para conocer su comportamiento real durante sismos de pequeña amplitud e inclusive de moderada amplitud, como los que se registraron en el edificio en estudio. Sin embargo, el aplicar estas metodologías a sistemas donde se experimente un comportamiento no lineal significativo, lo cual es altamente probable que suceda durante un sismo de magnitud elevada, puede conducir a estimaciones erróneas. Se considera necesario establecer metodologías y estrategias que consideren un comportamiento no lineal de los sistemas estructurales.

REFERENCIAS

Agbabian M. S., Masri S. F., Miller R. K., Caughey T. K. (1991), "System Identification Approach to Detection of Structural Changes", Journal of Engineering Mechanics, 117, 2, febrero

Beck J. y Jennings P. (1980), "Structural Identification using Linear Models and Earthquake Records", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 8, pages 145-160

Bekey, G. A. (1970), "System Identification - An Introduction and a Survey", Simulation, Vol. 5, No. 4, octubre, pages 151-166hanics, Vol 116, 10

DeCarlo R. (1989), "Linear System - A State Variable Approach with Numerical Implementation ". Prentice Hall

Loh C. y Tsaur Y. (1988), "Time Domain Estimation of Structural Parameters", Engrg. Struct., 10, enero, 95-105

Lung L. (1987), "System Identification - Theory for the User", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

MATLAB (1985), "High-Performance Numeric Computation Software"

Matzen V. y McNiven H. (1976), "Investigation of the Inelastic Characteristics of a Single Steel Structure using Systems Identification and Shaking Table Experiments", reporte EERC 76/20, agosto

McVerry G. H. (1980), "Structural Identification in the Frequency Domain from Earthquake Records", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 8, pags 161-180

Meli R., Murià Vila D., Quaaas R. (1993), "Instrumentación sísmica del edificio Jalapa para el estudio de efectos de sitio y de la respuesta estructural", *Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Puerto Vallarta, Jal., octubre

Murià Vila D., González Alcorta R., Moreno Rubín de Celis S.M., Quant Rodríguez R. (1993), "Análisis preliminar de la respuesta estructural de un edificio instrumentado", Instituto de Ingeniería, UNAM, proyecto 2561, patrocinado por la Comunidad Económica Europea, abril

Murià Vila D., González Alcorta R., Sánchez Ramírez R. (1991), "Propiedades dinámicas de una estructura masiva desplantada en suelo blando", Instituto de Ingeniería, UNAM, proyecto 9759, septiembre

Natke H.G. (1990), "Recent trends in system identification", *Structural Dynamics*, Kratzig et al, pags 283-289

Newmark N. M. (1959), "A Method of Computation for Structural Dynamics", *J. Eng. Mech. Div., ASCE* 85, julio

Papageorgiou A. y Lin B. (1989), "Study of the Earthquake Response of the Base-Isolated Law and Justice Center in Rancho Cucamonga", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 8, pags 1189-1200

Papageorgiou A. y Lin B. (1990), "Analysis of Recorded Earthquake Response and Identification of a multi-storey structure accounting for Foundation interaction effects", Computational Mechanics Publications, pages 55-64

Quaas W. R. y Almora M. D. (1993a), "Instrumentación sísmica del edificio Jalapa", Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal. , octubre

Quaas W. R. y Almora M. D. (1993b), "Acelerogramas de los temblores del 14 de mayo de 1993 obtenidos en el edificio Jalapa", Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, mayo

Sage, A. P. (1972), "System Identification - History, Methodology, Future Prospects", System Identification of Vibrating Structures; Mathematical Models from Tests Data, D. Pilkey and R. Cohen, eds., Winter Annual Meeting of ASME, pages 1-22

Söderström T. and Stoica P. (1989), "System Identification", Prentice Hall International, London

Udwadia F.E. y Jertah N. (1980), "Time Variations of Structural Properties During Strong Ground Motions, Journal of Engineering Mechanical Division, ASCE, 106, enero, pages 111-121

DiPasquale E. y Cakmak A. S. (1990), "Seismic damage Assesment using Linear Models", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 9, No. 4, pages 194-215

Distefano N. y Rath A. (1974), "Modelling and Identification in Nonlinear Structural Dynamics-I. One Degree of Freedom Models", reporte EERC/74-15, diciembre

Eykhoff P. (1974), "System Identification", North-Holland, Amsterdam.

Gentile C. (1990), "Parametric Identification of Equivalent Models for Masonry Structures", Structural Dynamics, Kratzig et al, pags 457-464

Goodwin G. C. and Payne R. L. (1977), "Dynamic System Identification: Experiment Design and Data Analysis", Academic Press, New York

Hart G. C. y Yao J. (1977), "System Identification in Structural Dynamics", Journal of Engineering Mechanics of ASCE, diciembre, pags 1089-1104

Iemura H. y Jennings P. C. (1974), "Histeretic Response of a Nine-Storey Reinforced Concrete Building", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 3, marzo, pags 183-201

Iwan W. D. y Cifuentes A. O. (1986), "A model for System Identification of Degrading Structures", Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 14, 19-33

Jurukovsky D. (1987), "Mathematical Modelling by System Identification Technics", Engineering Aspects of Earthquakes Phenomen, Edit. A. Koridle, pags 137-150

Jurukovsky D. y Jovanovic O. (1990), "System Identification as a Tool for Mathematical Modelling in Earthquake Engineering", Structural Dynamics, Kratzig et al, pags 413-418

Kalman R. E. (1960), "A New Approach to Linear Filtering And Prediction Problems", Journal of Basic Engineering, marzo

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Kaya I. y McNiven H. (1978), "Investigation of the Elastic Characteristics of a Three Storey Steel Frame using System Identification", reporte UCB/EERC-78/24, noviembre

Kozin F. y Natke H. G. (1986), "System Identification Technics", Structural Safety, No. 3, pags 269-316

Lin C. C., Soong T. T. y Natke H. G. (1990), " Real Time System Identification of Degrading Structures", Journal of Engineering

Ovando E., "Determinación preliminar de las propiedades dinámicas del subsuelo bajo el edificio Jalapa", Instituto de Ingeniería, UNAM, proyecto 2561, feb 1993

Tabla 1 Estimación de los parámetros en la simulación de un sistema de dos grados de libertad

PARÁMETRO	VALOR REAL	VALORES ESTIMADOS	
		CASO 1	CASO 2
$-k_b / m_b$	-100	-101.70	-100.28
k_b / m_b	100	100.68	100.28
$-c_b / m_b$	-0.2	-0.78	-0.18
c_b / m_b	0.2	1.69	0.18
k_b / m_s	40	38.83	40.11
$-(k_b + k_s) / m_s$	-160	-157.7	-160.49
c_b / m_s	0.08	-0.16	0.072
$-(c_b + c_s) / m_s$	-2.40	-1.81	-2.39

Tabla 2 Estimación de los parámetros en la simulación de un sistema de tres grados de libertad

PARÁMETRO	VALOR REAL	VALORES ESTIMADOS		
		CASO 1	CASO 2	CASO 3
k_e	1000	1002	1037	1878
c_e	8	7.6	3	115
k_x	500	499.6	501.6	539
c_x	9.50	9.10	9.30	-0.2
k_r	4000	3985	3902	3081
c_r	139	141	143.2	100

Tabla 3 Estimación de los parámetros en la simulación de un sistema de cinco grados de libertad

PARÁMETRO	VALOR REAL	VALORES ESTIMADOS			
		CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
k_3	1000	992	1002	997	993
c_3	4.24	4.00	4.00	5.00	4.31
k_2	1500	1502	1469	1481	1482
c_2	6.91	7.00	8.00	8.00	7.00
k_1	2000	1990	1952	1900	1975
c_1	9.16	10.00	9.00	10.00	9.43
k_x	3500	3479	3504	3553	3465
c_x	52.92	51.00	52.00	52.00	51.52
k_r	12876.36	11975	12030	12040	12023
c_r	876.36	875.00	885.00	883.00	873.30

Tabla 4 Frecuencias naturales de vibrar (en Hz) del primer modo en cada dirección, obtenidas a partir de las pruebas de vibración ambiental y de los registros sísmicos.

EVENTO	DIRECCIÓN T	DIRECCIÓN L	TORSIÓN
V.A.	0.44	0.73	0.83
SISMO 1	0.37	0.66	0.63
SISMO 2	0.33	0.66	0.61

V.A. = Vibración ambiental

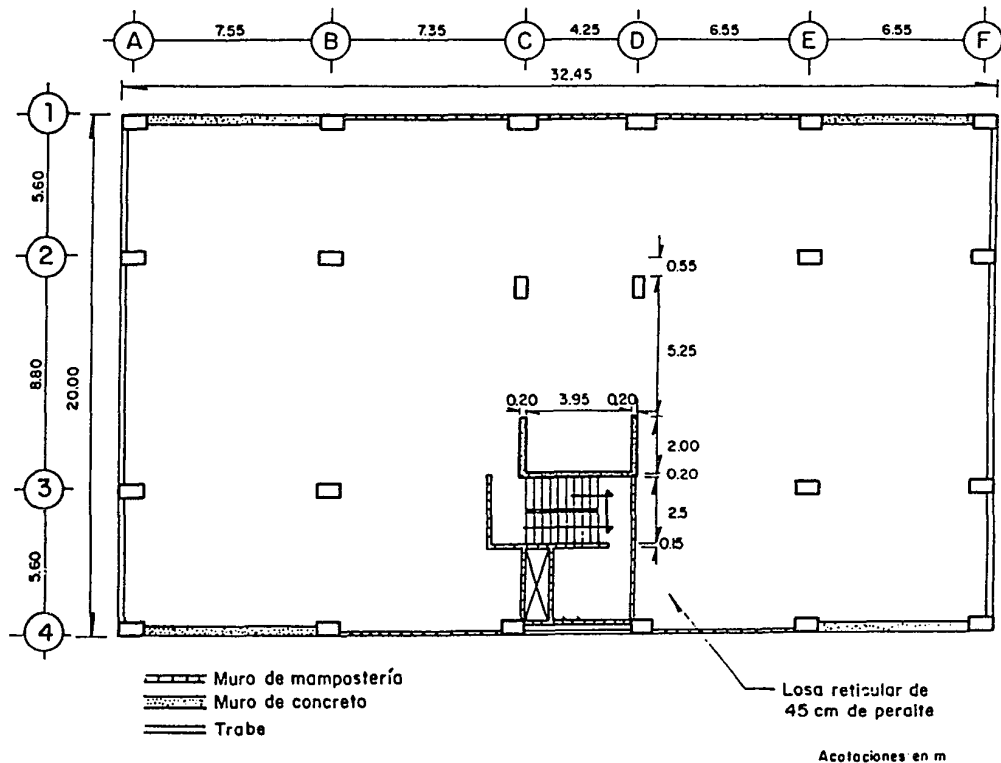


Fig 1 Planta tipo del edificio Jalapa

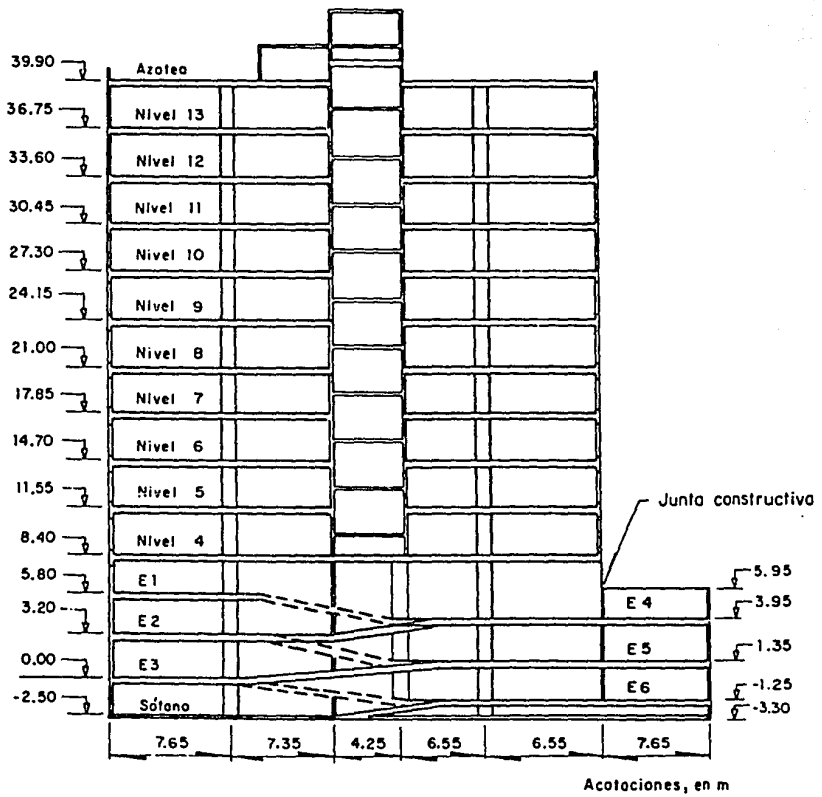


Fig 2 Elevación del edificio Jalapa

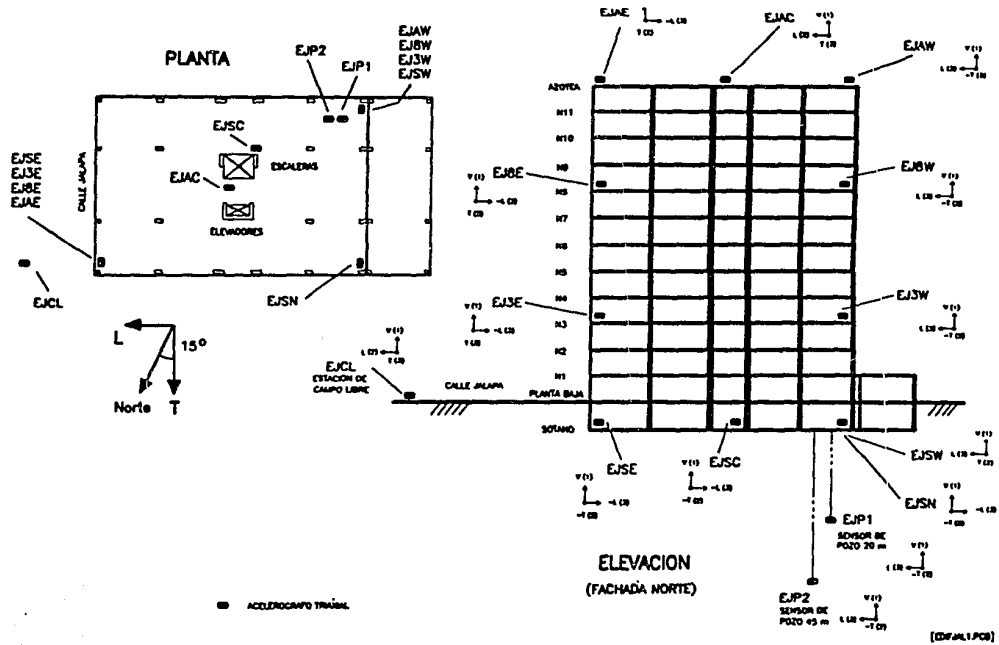
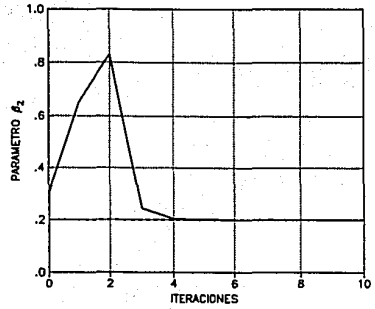
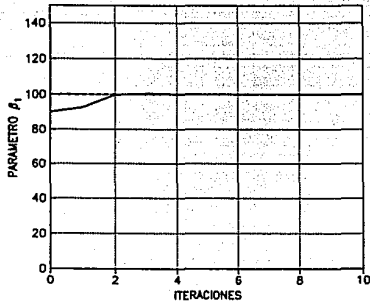


Fig 3 Instrumentación sísmica del edificio Jalapa

CASO 1



CASO 2

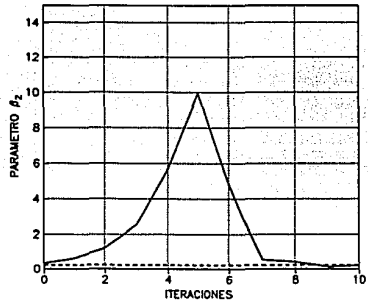
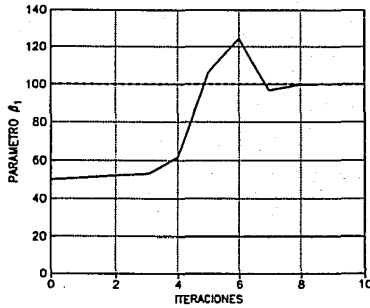


Fig 4 Ajuste de los parámetros β_1 y β_2 del modelo de un grado de libertad, con respecto al número de iteraciones en la estimación

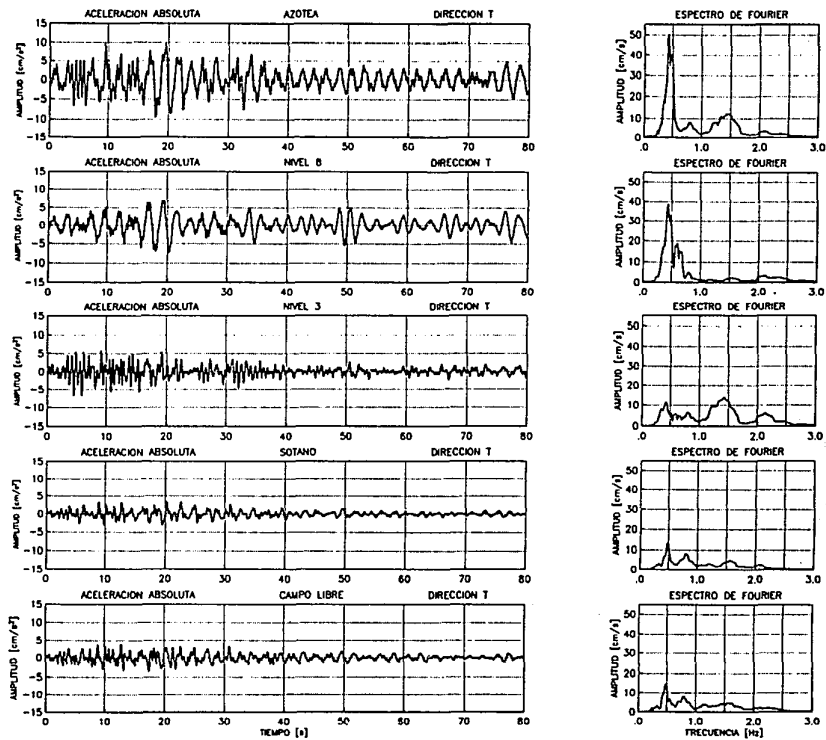


Fig 5 Acelerogramas registrados en el edificio Jalapa durante el sismo 1. Dirección T

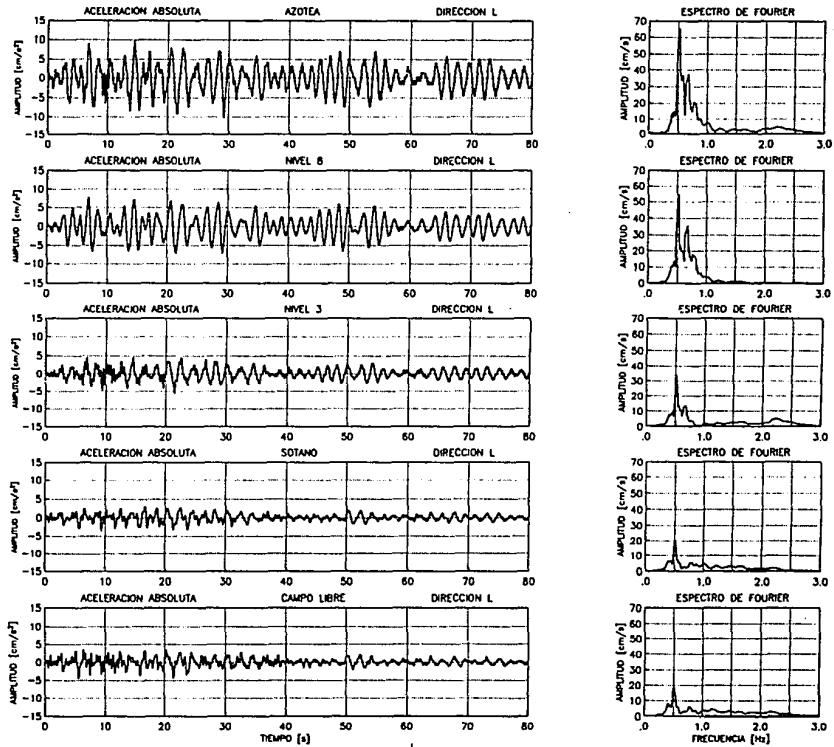
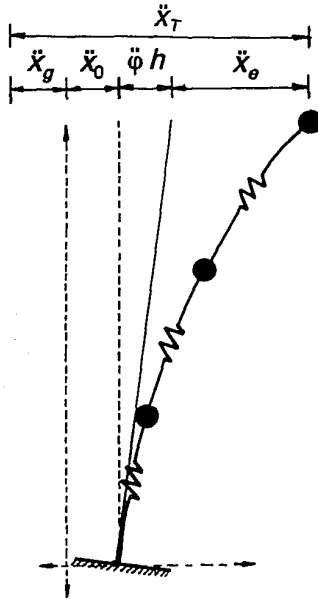


Fig 6 Acelerogramas registrados en el edificio Jalapa durante el sismo 1. Dirección L



- \ddot{x}_T aceleración absoluta en azotea
- \ddot{x}_g aceleración en campo libre
- \ddot{x}_0 aceleración en la base de la estructura
- $\ddot{\phi}$ aceleración angular en la base de la estructura por cabeceo
- h altura del nivel de azotea con respecto a la base
- \ddot{x}_e aceleración por deformación de estructura

Fig 7 Componentes de la aceleración en azotea

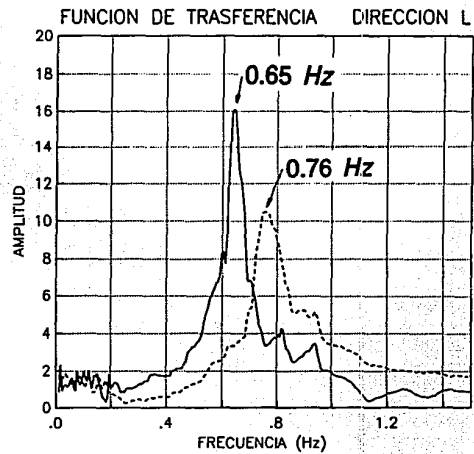
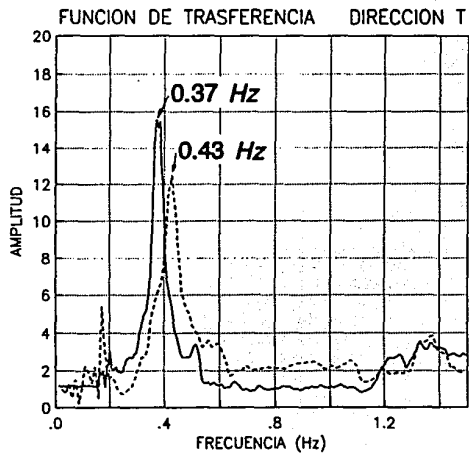


Fig 8 Funciones de Transferencia obtenidas del cociente de los espectros de azotea y campo libre, para el sismo 1 registrado en el edificio Jalapa

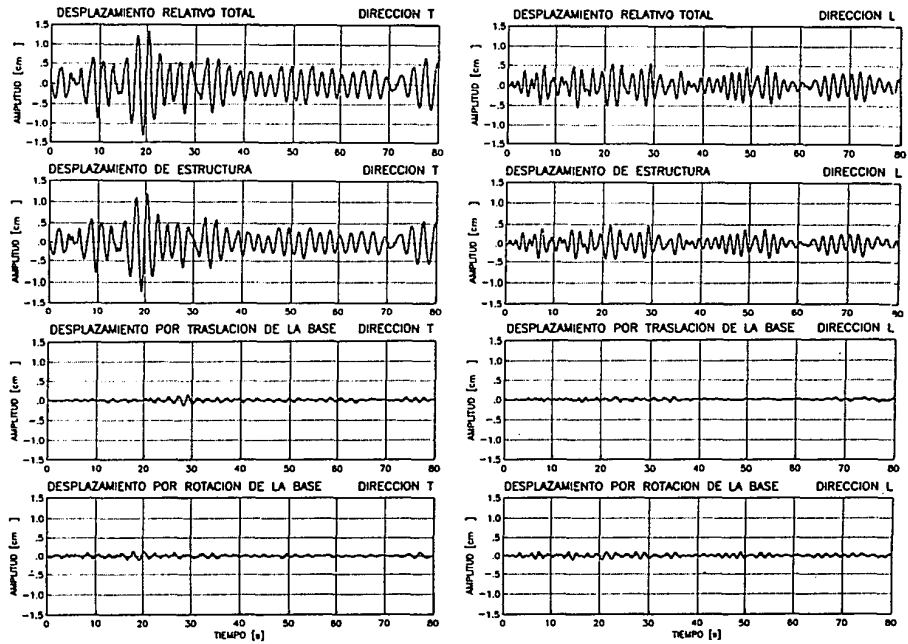


Fig 9 Componentes del desplazamiento relativo de azotea en el edificio Jalapa, para el sismo 1

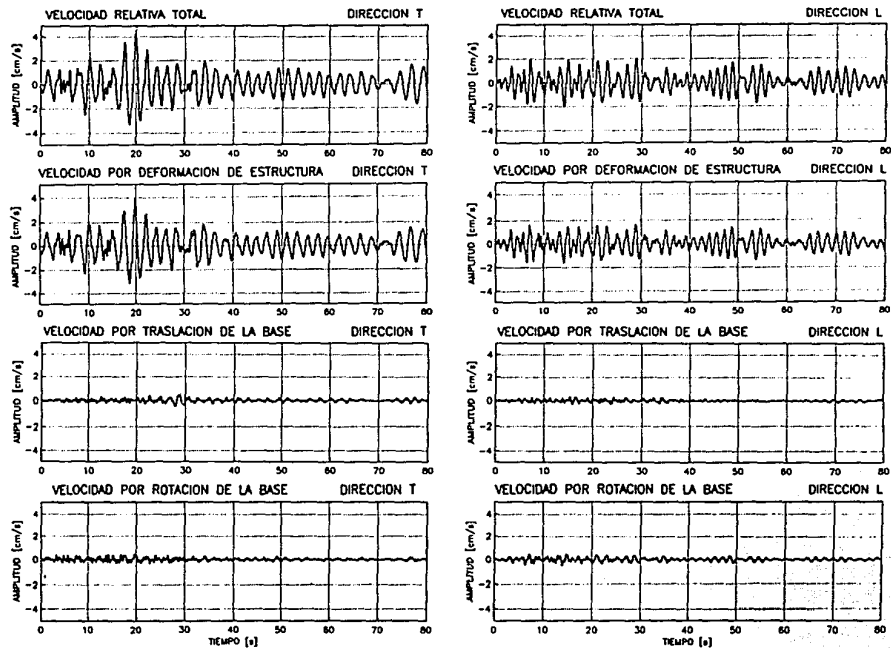


Fig 10 Componentes de la velocidad relativa de azotea en el edificio Jalapa, para el sismo 1

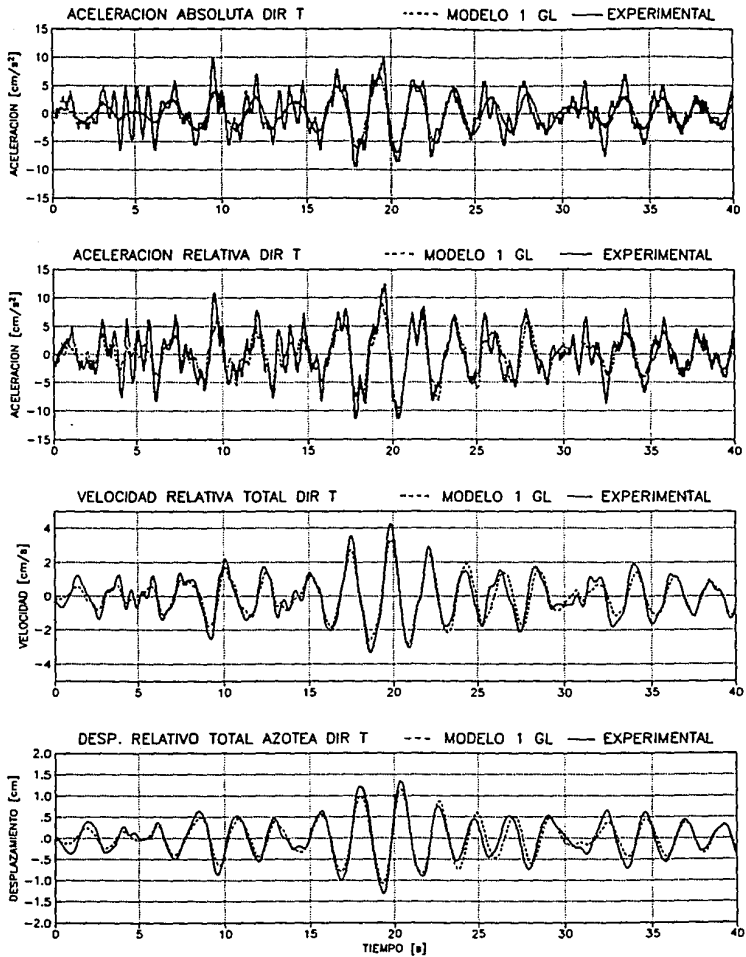


Fig 11 Comparación entre la respuesta registrada y la calculada con el modelo de un grado de libertad, para el sismo 1. Dirección T

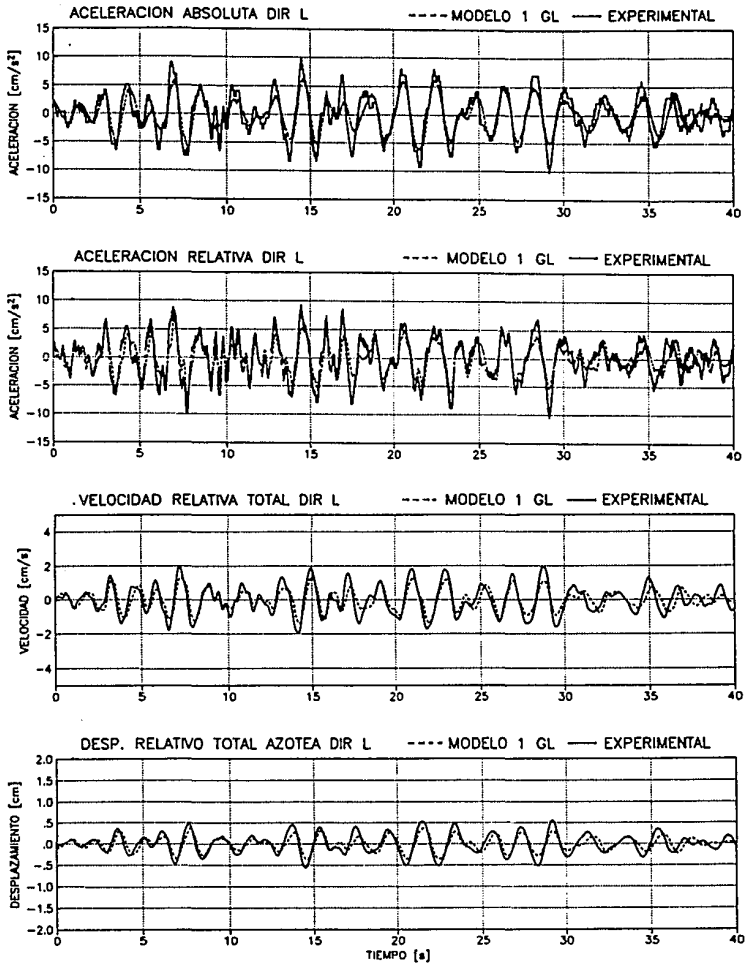


Fig 12 Comparación entre la respuesta registrada y la calculada con el modelo de un grado de libertad, para el sismo 1. Dirección L

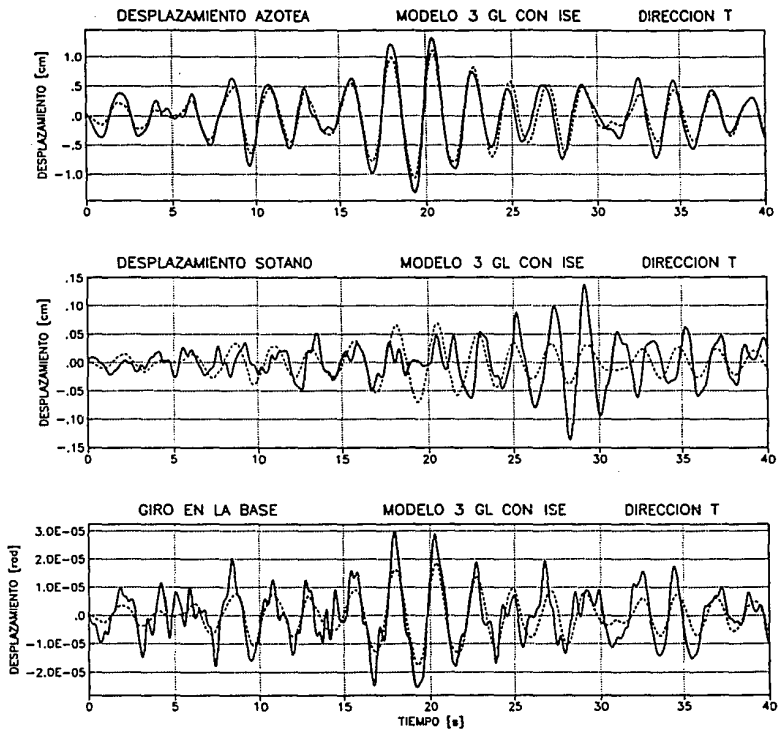


Fig 13 Comparación entre los desplazamientos relativos obtenidos a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de tres grados de libertad. Dirección T

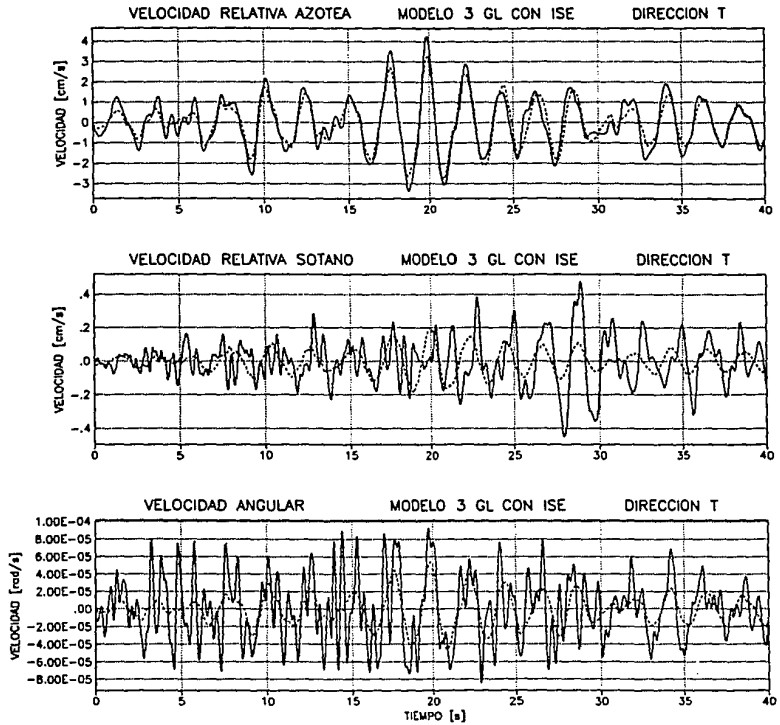


Fig 14 Comparación entre las velocidades relativas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de tres grados de libertad. Dirección T

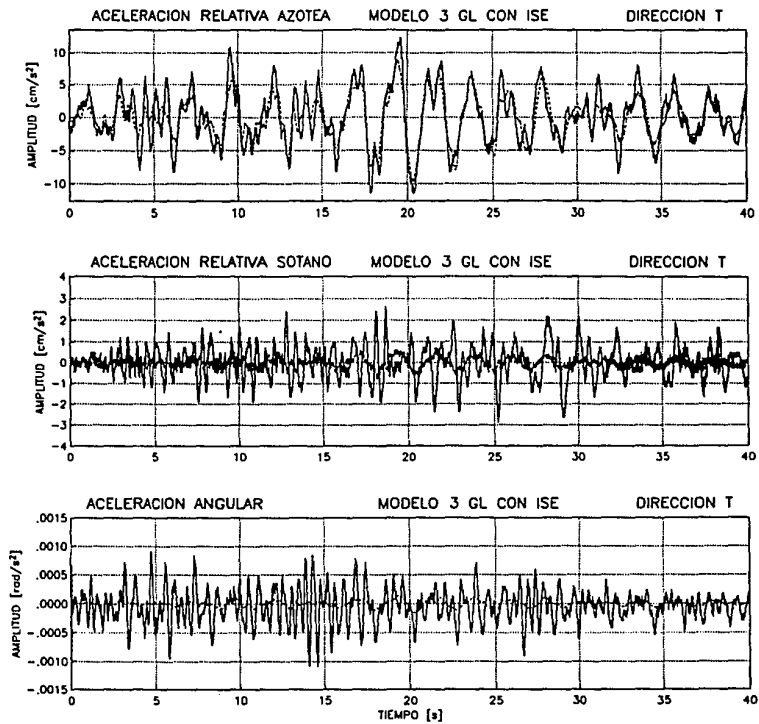


Fig 15 Comparación entre las aceleraciones relativas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de tres grados de libertad. Dirección T

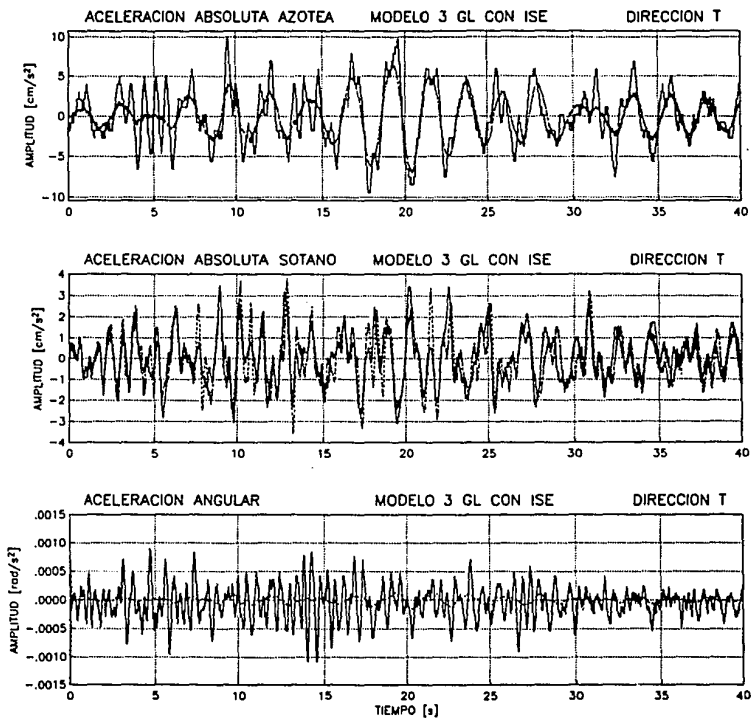


Fig 16 Comparación entre las aceleraciones absolutas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de tres grados de libertad. Dirección T

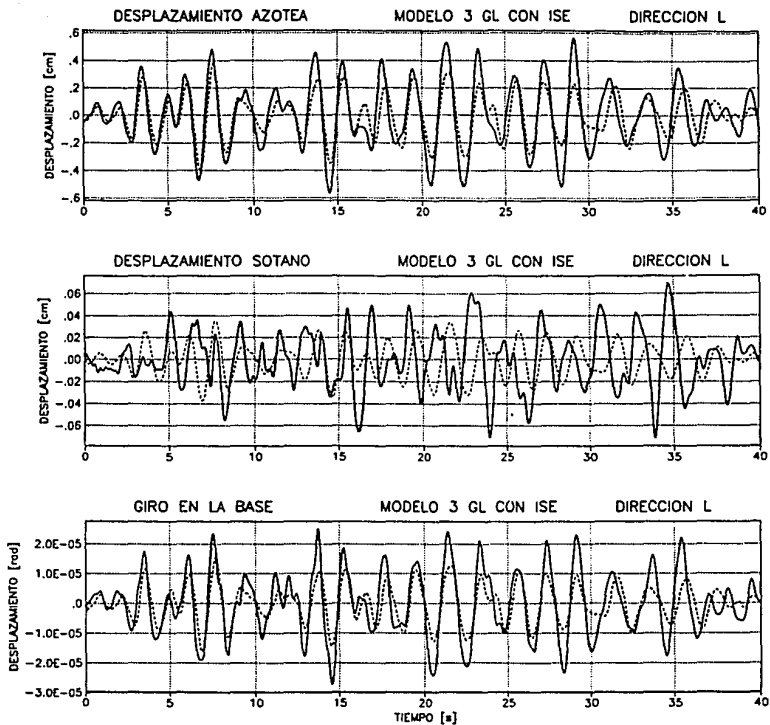


Fig 17 Comparación entre los desplazamientos relativos obtenidos a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de tres grados de libertad. Dirección L

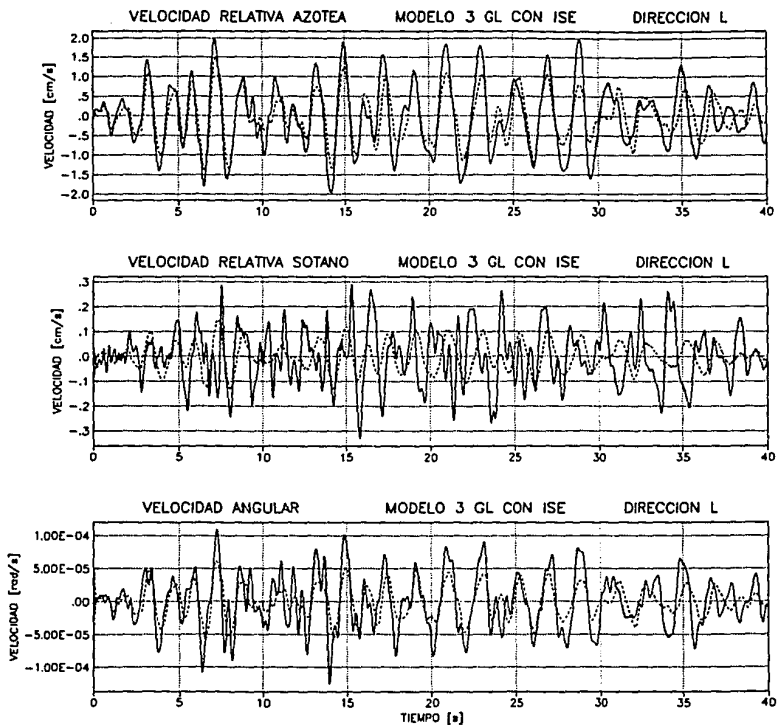


Fig 18 Comparación entre las velocidades relativas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de tres grados de libertad. Dirección L

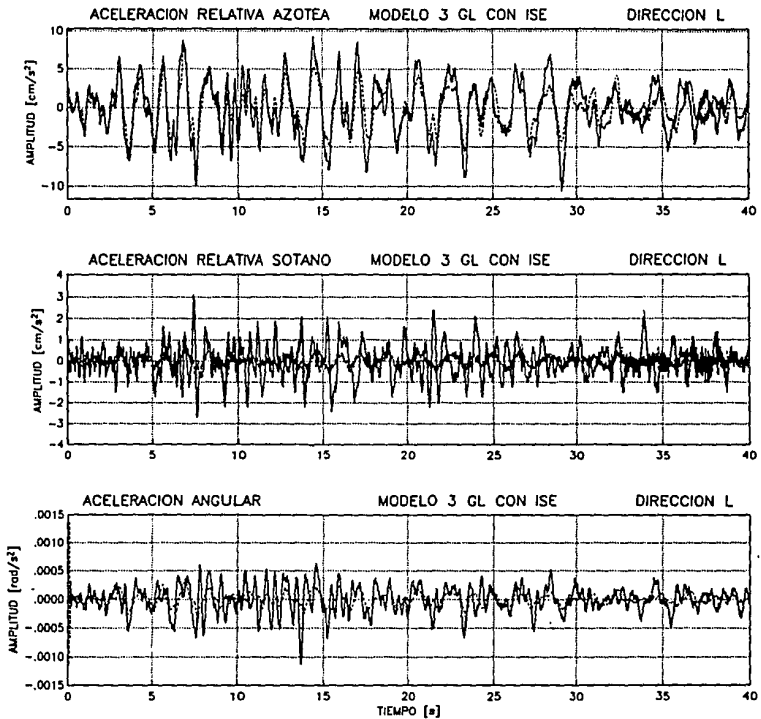


Fig 19 Comparación entre las aceleraciones relativas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de tres grados de libertad. Dirección L

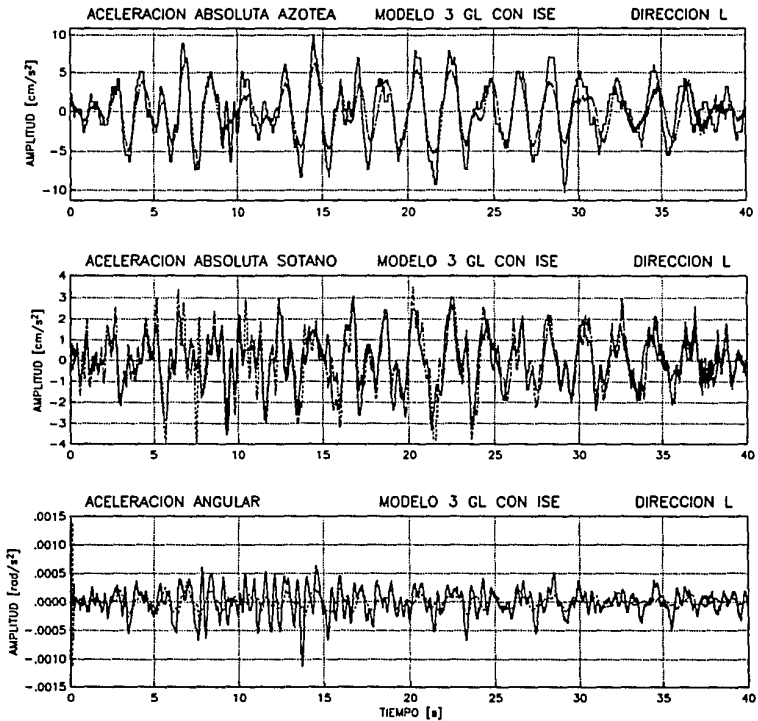


Fig 20 Comparación entre las aceleraciones absolutas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de tres grados de libertad. Dirección L

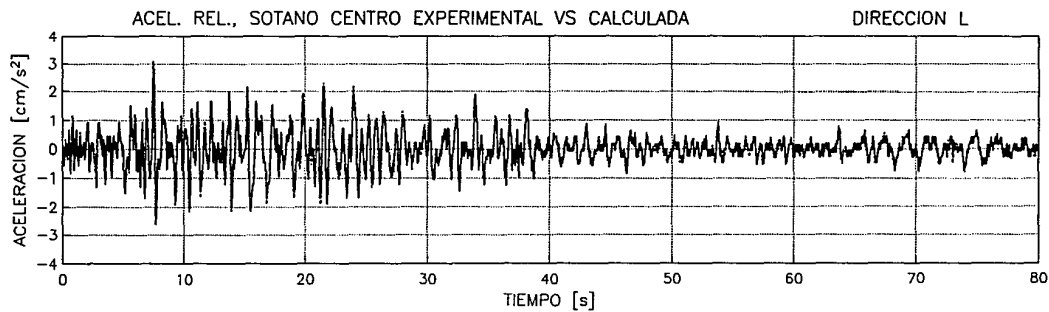
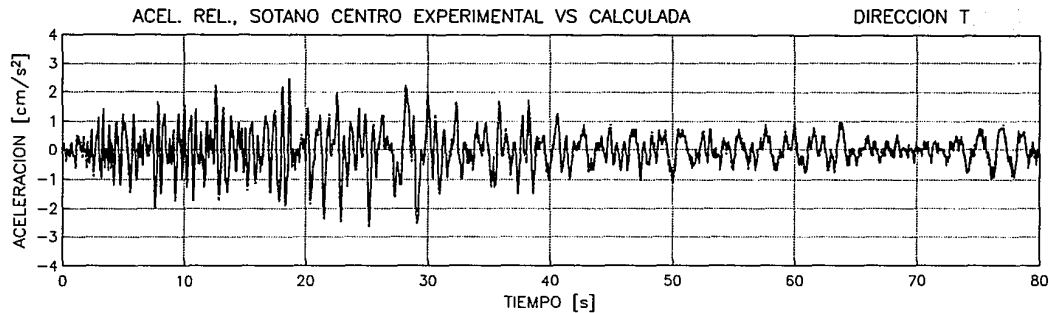


Fig 21 Comparación entre la señal registrada y la calculada, sótano centro

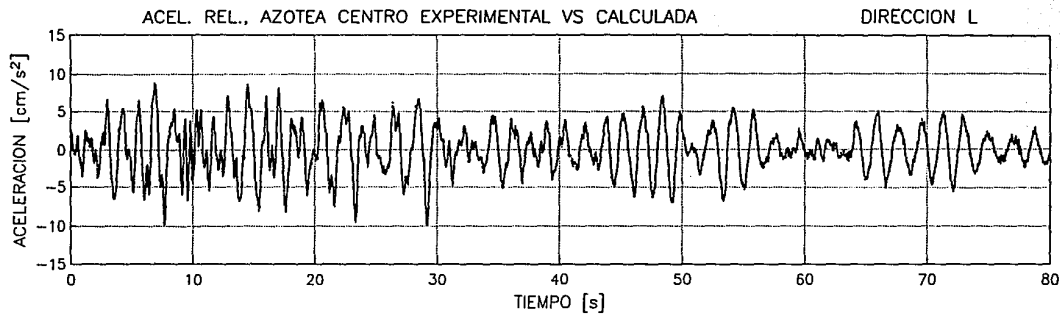
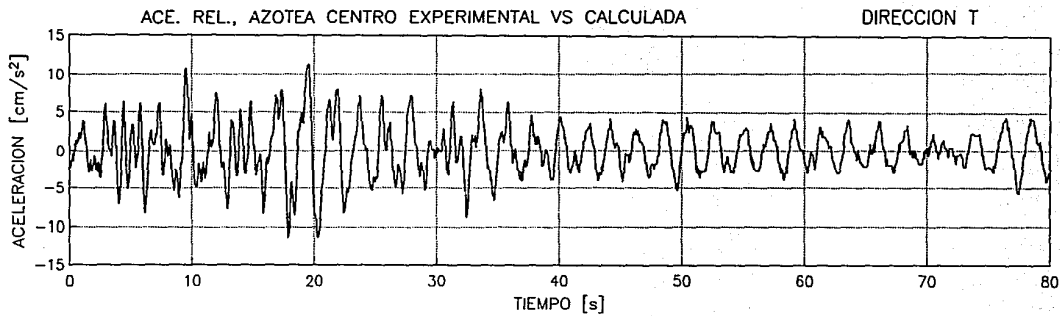


Fig 22 Comparación entre la señal registrada y la calculada, azotea centro

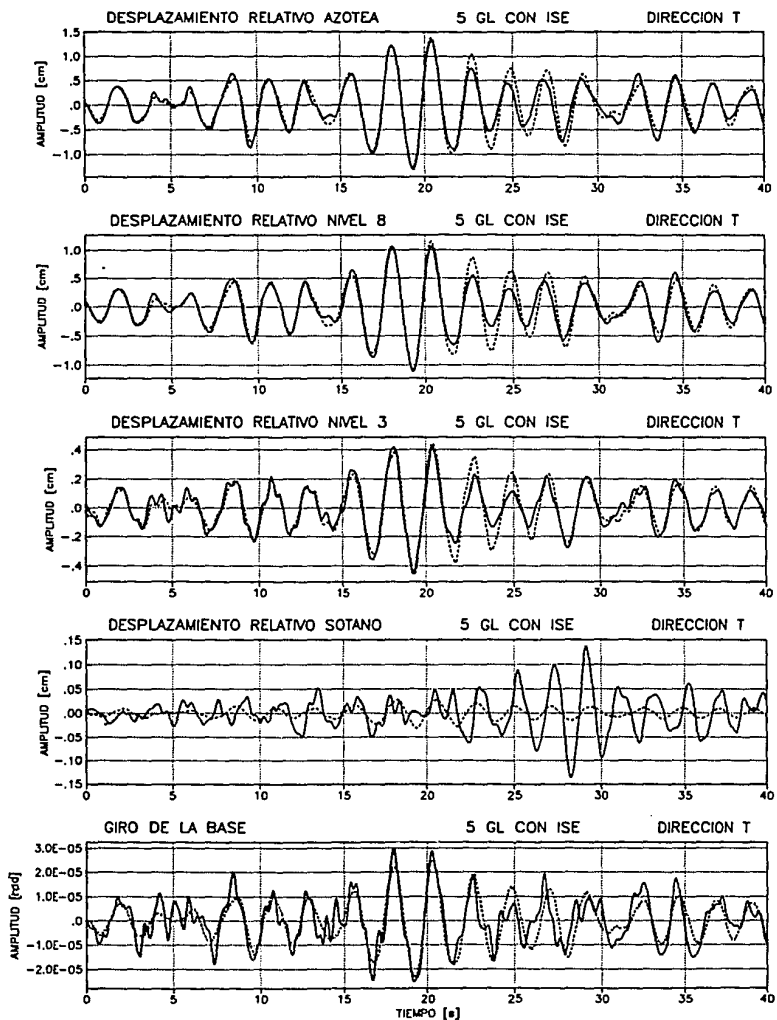


Fig 23 Comparación entre los desplazamientos relativos obtenidos a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de cinco grados de libertad. Dirección T

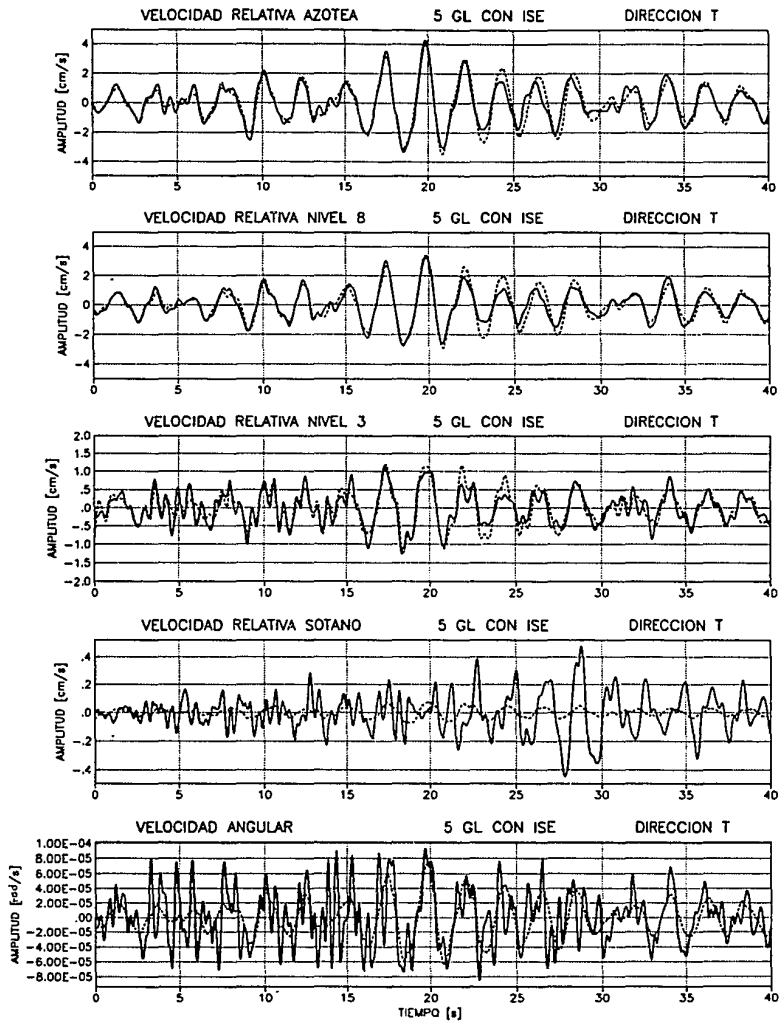


Fig 24 Comparación entre las velocidades relativas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de cinco grados de libertad. Dirección T

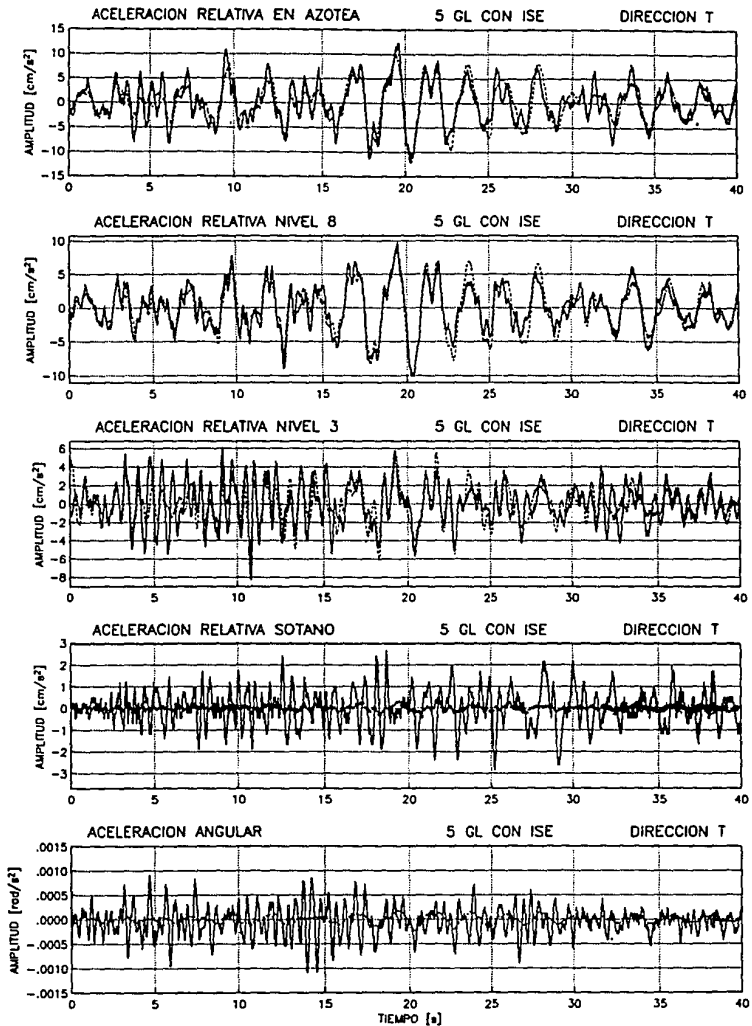


Fig 25 Comparación entre las aceleraciones relativas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de cinco grados de libertad. Dirección T

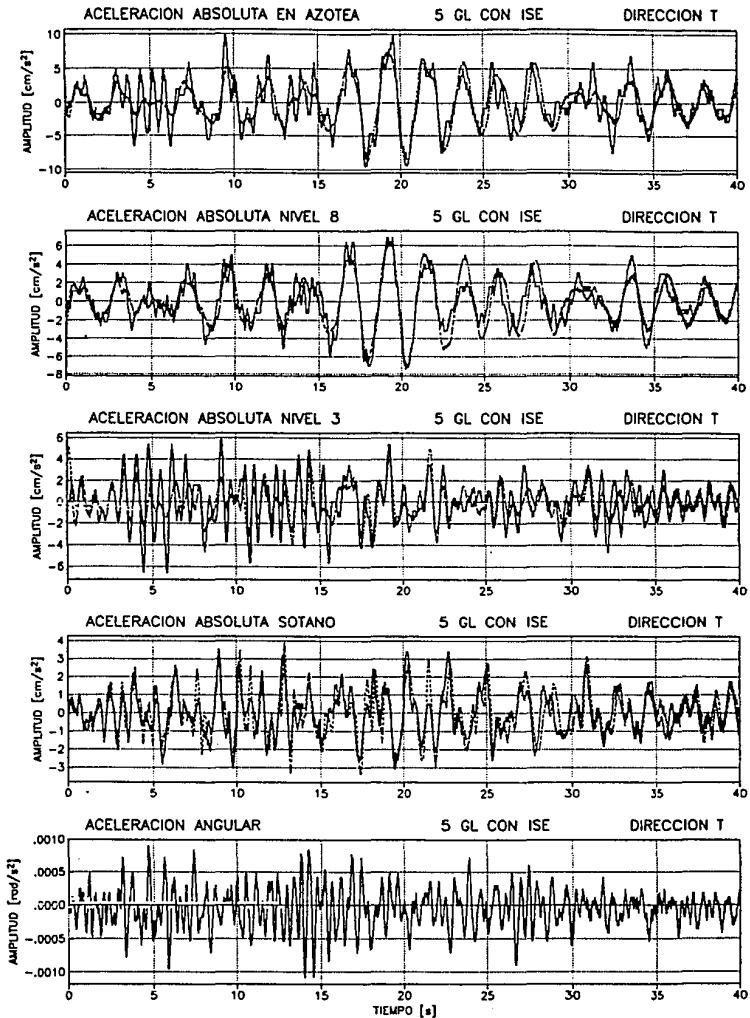


Fig 26 Comparación entre las aceleraciones absolutas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de cinco grados de libertad. Dirección T

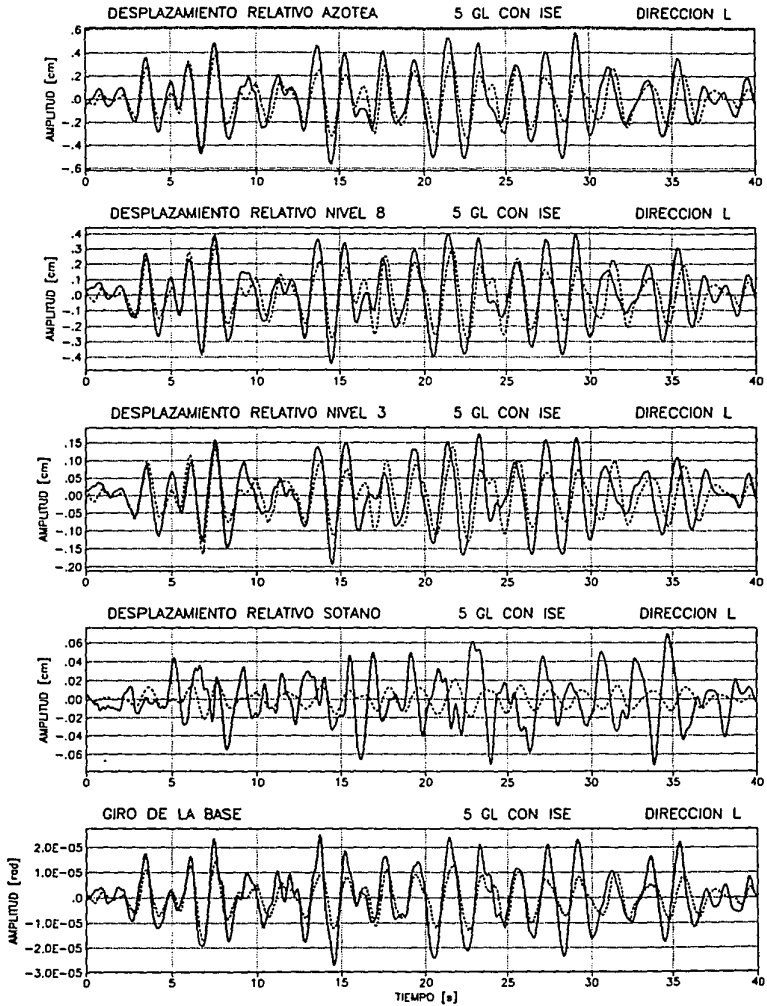


Fig 27 Comparación entre los desplazamientos relativos obtenidos a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de cinco grados de libertad. Dirección L

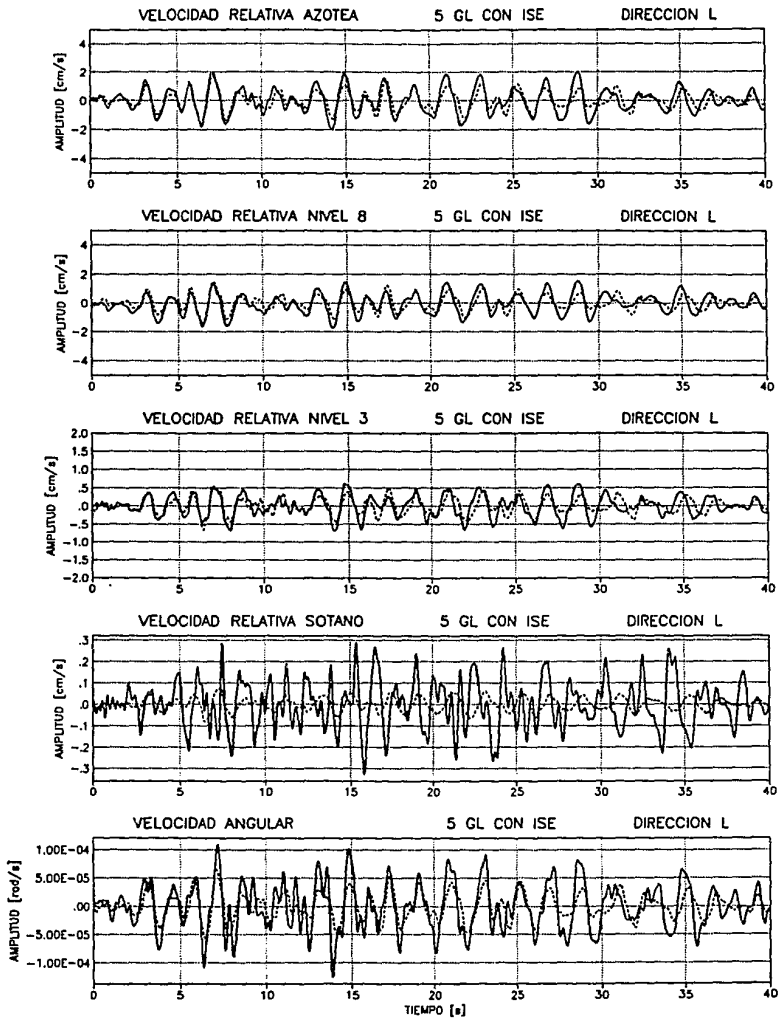


Fig 28 Comparación entre las velocidades relativas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de cinco grados de libertad. Dirección L

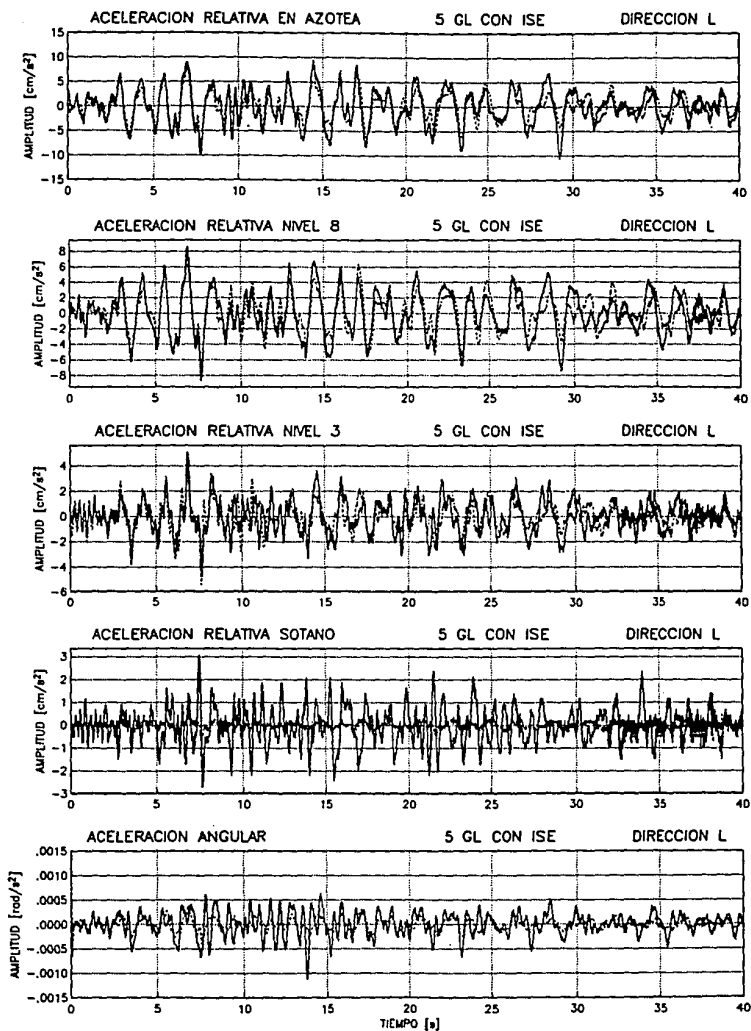


Fig 29 Comparación entre las aceleraciones relativas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de cinco grados de libertad. Dirección L

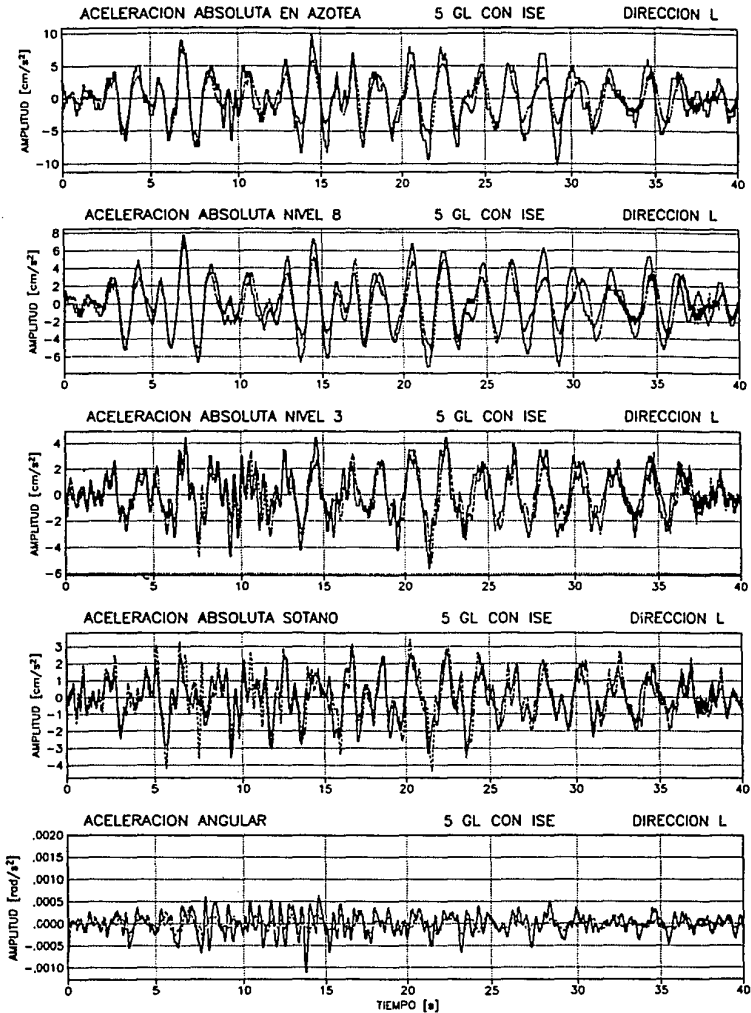
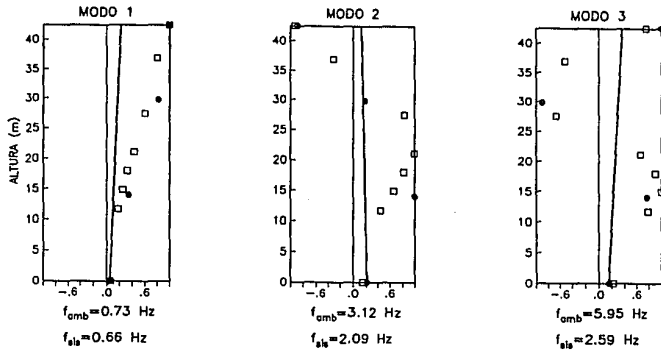
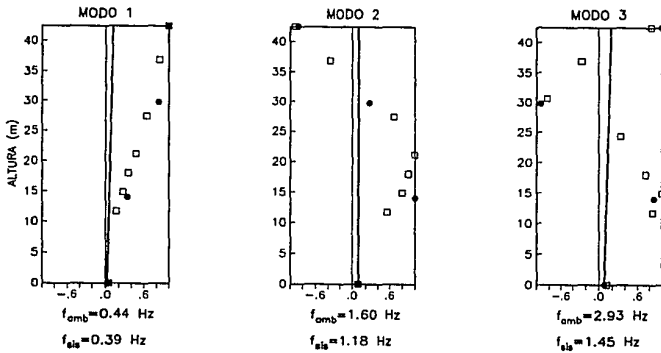


Fig 30 Comparación entre las aceleraciones absolutas obtenidas a partir de la respuesta registrada y los calculados con el modelo matemático de cinco grados de libertad. Dirección L

DIRECCION L



DIRECCION T



- f_{omb} = Frecuencia obtenida de las pruebas de vibración ambiental
- f_{sis} = Frecuencia obtenida de la estimación de parámetros en el sismo 1
- Dato obtenido en las pruebas de vibración ambiental
- Dato obtenido de la estimación de parámetros

Fig 31 Comparación de las formas modales obtenidas con vibración ambiental y con la estimación de parámetros para el sismo 1