

Universidad Nacional Autónoma de México

01161
22

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



Estudio de la Respuesta Dinámica de un Edificio Instrumentado

T E S I S
PRESENTADA POR

Arabella Zapata Escobar

PARA OBTENER EL GRADO DE
Maestra en Ingeniería
(Estructuras)

DIRECTOR: Dr David Murià Vila

292354

MÉXICO D.F. ABRIL DE 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

RESUMEN

En este trabajo se analizaron 14 registros sísmicos tomados en un edificio instrumentado en el año de 1992 (Edificio Jal), que ha sido dos veces rehabilitado debido al daño sufrido en sismos ocurridos desde 1985. El Edificio está localizado en la zona blanda de la ciudad de México con una frecuencia dominante del sitio de 0.5 Hz. Se usaron técnicas de identificación de sistemas paramétricas y no paramétricas para estimar las principales propiedades dinámicas del edificio: frecuencias naturales de vibrar, porcentajes de amortiguamientos críticos modales, factores de participación modal y formas modales, incluyendo los efectos de interacción suelo-estructura. Una de las técnicas empleadas permitió observar cambios en los parámetros dinámicos entre los diferentes sismos analizados y en el transcurso de un mismo temblor, evidenciando una respuesta no lineal asociada con daño estructural leve y no estructural.

Se observó que casi sin excepción el primer modo de vibrar domina la respuesta estructural, aún y a veces especialmente en los casos en los cuales se observaron no linealidades. Las frecuencias del primero y segundo modos cambian a veces de manera importante, dependiendo de la intensidad del movimiento. Los métodos de identificación no paramétrica resultan más sencillos cuando la estructura se comporta linealmente. Sin embargo, cuando se tiene una respuesta no lineal se recomienda usar la técnica paramétrica modal que permite observar el deterioro acumulado de daño en la edificación aún para sismos pequeños. Se encontró que los efectos de interacción suelo-estructura fueron más significativos para los eventos ocurridos después de la segunda rehabilitación principalmente en la dirección corta del edificio.

Como resultado de esta investigación se destacan los alcances y limitaciones en el uso de las técnicas de identificación, se hace una discusión sobre la importancia de considerar los efectos de interacción suelo-estructura y se dan conclusiones orientadas a mejorar la instrumentación en edificios y el aprovechamiento de estos análisis en el conocimiento de la respuesta estructural.

A Dios
A mis padres Gloria y Renán
A mi abuela María (Q.E.P.D)
A mi País Colombia

AGRADECIMIENTOS

Al Dr David Murià Vila por ser mi maestro y amigo

A los Drs Roberto Meli Piralla, Ernesto Heredia Zavonni, José Alberto Escobar Sánchez, Sergio Alcocer Martínez de Castro y Mario Ordaz Schroeder por sus valiosos comentarios

A mis padres Gloria y Renán por su amor y apoyo, por encaminarme en la vida y en mi profesión

A mis hermanos Abdul, Carolina, Alejandro y Anton por su aliento espiritual

A mi abuela María (Q.E.P.D) por sus oraciones y su confianza en mí

A Mario por ser alguien especial en mi vida

A Claudia, Eduardo y Fernando por acompañarme y darme ánimo en los momentos difíciles

A Consuelo, Beto, Juan Diego y Juan Carlos por su colaboración para estar aquí

A todos mis amigos colombianos, peruanos y mexicanos, con quienes he compartido todos mis buenos y malos momentos

1. INTRODUCCIÓN

Eventos sísmicos como los ocurridos en México 1985, Northridge 1994, Japón 1995 y Turquía 1999 ocasionaron daños estructurales que han cuestionado los criterios de análisis y diseño sismorresistentes establecidos en los reglamentos de diseño vigentes. Así se crea la necesidad de mejorar tanto en el conocimiento de la respuesta estructural y la naturaleza de las acciones sísmicas a las que va a estar sometida la estructura, como en la estimación de las propiedades dinámicas reales de ésta. Lo anterior con el fin de definir criterios que resalten las características estructurales más deseables, para producir diseños más adecuados no sólo desde el punto de vista económico sino también de seguridad, evitando el colapso estructural.

La instrumentación de estructuras es una actividad que ha adquirido una gran importancia en ingeniería estructural, ya que permite conocer la respuesta real de las estructuras a través del análisis de registros de movimientos sísmicos de baja, moderada y gran intensidad a los que estarán sometidas y durante los cuales se comportarán lineal o no linealmente, existiendo la posibilidad de que exista daño estructural y no estructural. Paralelamente a la instrumentación se cuenta con técnicas de identificación de parámetros estructurales, que posibilitan el análisis de los registros obtenidos de una estructura instrumentada con el fin de estimar sus propiedades dinámicas tales como: frecuencias naturales de vibrar, porcentajes de amortiguamientos críticos modales, factores de participación modal y formas modales, permitiendo a su vez calibrar modelos analíticos que cada vez se acerquen más a la respuesta estructural real. Estas técnicas, llamadas técnicas de identificación de sistemas, hacen posible relacionar los datos experimentales con el modelo matemático que representa al sistema estructural y además permiten estimar las características dinámicas reales estructurales a partir de los registros sísmicos obtenidos.

Se han desarrollado técnicas de análisis no paramétrico en el dominio de la frecuencia, a través de estimativos espectrales, características frecuenciales y descomposición modal (Ljung, 1987); así como técnicas que permiten analizar los registros de movimientos sísmicos en el dominio del tiempo (Beck y Jennings, 1980) y determinar los parámetros que definen la respuesta dinámica estructural.

Un aspecto importante en la respuesta sísmica de las estructuras está íntimamente relacionado con la naturaleza del suelo en el cual están cimentadas, ya que su respuesta sísmica puede verse afectada por efectos de sitio o por la relación existente entre las propiedades inherentes a la estructura y al suelo de cimentación.

En el análisis y diseño de estructuras, es una práctica común suponer que éstas tienen cimentaciones rígidas y están desplantadas en suelos indeformables. Lo anterior no es necesariamente cierto ya que estudios realizados han demostrado que existe interacción entre el movimiento de la estructura con el del suelo en la cual está cimentada. El movimiento del suelo se ve afectado por el movimiento de la estructura, existiendo un acoplamiento. Tal comportamiento se conoce como interacción suelo-estructura (ISE), ésta tiene mayor importancia en la respuesta sísmica de edificios cimentados en suelos blandos. Sin embargo, la magnitud de los efectos de interacción depende más de las relaciones de masa y rigidez existentes entre la cimentación y el sistema estructural que de la presencia de un depósito de suelo blando o de una estructura flexible (Jennings y Bielak, 1973). Estos efectos pueden influir en la respuesta estructural de tal forma que las propiedades dinámicas estructurales varíen considerablemente.

Existen dos tipos de interacción: cinemática e inercial. En la interacción cinemática el movimiento en el terreno se ve modificado por la presencia de la cimentación ya que ésta tiene una rigidez considerablemente mayor a la del suelo. El efecto principal de la interacción cinemática consiste en filtrar los componentes de alta frecuencia o disminuir la intensidad del movimiento en la base de la estructura respecto a los de campo libre, debido esencialmente a la rigidez y geometría de la cimentación. Este efecto será más importante entre mayor sea: el contraste de rigideces entre la cimentación y el suelo, o el tamaño de la cimentación en comparación con la longitud de onda del movimiento del terreno.

La interacción inercial tiene mayor importancia, ya que en ésta se manifiesta la influencia directa de las relaciones que existen entre las características dinámicas de la cimentación y de la estructura, existiendo un acoplamiento en el cual el movimiento de la cimentación se ve afectado por el movimiento de la superestructura. La respuesta del sistema puede aumentar cuando el período natural de vibración modificado por la interacción se acerca al período dominante del terreno (Rosenblueth y Resendiz, 1988), o en algunos casos, la fuerza

cortante en la base puede reducirse con relación a aquella que tendría si la superestructura estuviera cimentada en una base rígida. Los efectos de la interacción inercial se pueden manifestar en: un alargamiento del período fundamental de la estructura, ya que la deformación del suelo permite a la cimentación tener movimientos de cabeceo y traslación horizontal que reducen la rigidez global del sistema, con relación a la de la estructura con base rígida, también se aumentan los desplazamientos totales de los entrepisos por la misma razón. Hay cambios en el amortiguamiento del sistema por la irradiación de ondas de la estructura al suelo, en las formas modales y en los factores de participación modal.

Existen en la literatura numerosos estudios en los cuales se tienen propuestas analíticas (Jennings y Bielak, 1973; Luco, 1980; Avilés y Pérez, 1996) y de aplicaciones reales (Luco et al, 1987; Mendoza et al, 1991) con el fin de determinar las combinaciones más desfavorables entre las propiedades dinámicas de la cimentación y el suelo, y en qué casos estos efectos son despreciables. Es importante tener en cuenta estos efectos cuando se quieren estimar las propiedades dinámicas de un edificio, con el fin de evaluar su importancia, y poder determinar adecuadamente las características tanto del sistema como de la estructura.

1.1. Antecedentes

A fines de 1992 se instrumentó un edificio (Edificio Jal) como parte de un proyecto conjunto de investigación entre el Instituto de Ingeniería y el Politécnico de Milán, para estudiar la amplificación de las ondas sísmicas, la interacción suelo-estructura y la respuesta de edificios construidos en suelos blandos en la ciudad de México (Meli et al, 1994). Se han registrado sismos que han provocado daños estructurales y no estructurales al edificio por lo que ha sido rehabilitado dos veces. Se han aplicado técnicas de identificación de sistemas no paramétricas y paramétricas para estimar frecuencias de vibración correspondientes a modos fundamentales y modos superiores, fracciones de amortiguamiento crítico y formas modales de tres componentes de movimiento (Toro Jaramillo, 1997; Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001). Estos análisis han permitido conocer la respuesta del edificio ante sismos de intensidad moderada y baja a los que ha estado sometido, observándose cambios en sus características entre los diferentes sismos analizados y durante un mismo sismo, lo cual ha evidenciado un comportamiento no lineal asociado con daño estructural y no estructural.

Se han llevado a cabo también estudios de identificación de los efectos ISE (Paolucci, 1993; Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001). Algunas de estas propuestas basan sus análisis en funciones de transferencia (Paolucci, 1993) o en el análisis de los espectros de Fourier de las señales (Luco et al, 1987; Mendoza et al, 1991). Estos estudios han demostrado la importancia de tener una adecuada instrumentación sísmica y un buen conocimiento tanto de las propiedades del suelo y del edificio como de las características del evento sísmico.

Se han desarrollado modelos que consideran uno y varios instrumentos en la estructura, con los cuales se ha aplicado una técnica paramétrica basada en un planteamiento modal en el dominio del tiempo (Toro Jaramillo, 1997). Estos análisis han permitido conocer la variación de los parámetros estructurales durante los eventos más significativos y se ha encontrado una buena correlación con las técnicas no paramétricas tradicionales empleadas (Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001). Sin embargo, no se han explorado modelos que permitan conocer y caracterizar los efectos ISE haciendo uso de esta misma técnica.

1.2. Objetivos y alcance

Este trabajo tiene como objetivo identificar las propiedades dinámicas del edificio Jal durante los eventos ocurridos después de la segunda rehabilitación y evaluar los efectos ISE para los eventos seleccionados, antes y después de ésta, con el fin de encontrar las características de la respuesta sísmica tanto del sistema como de la estructura. De las numerosas técnicas paramétricas y no paramétricas que existen en la literatura, en este trabajo se seleccionaron algunas de las más comunes que se han empleado en México (Pérez Roldán, 1995; Toro Jaramillo, 1997; Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001), para estimar las principales propiedades dinámicas del edificio Jal, e incluso, conocer la variación secuencial de éstas para un mismo evento cuando existe una respuesta no lineal y explorar nuevos modelos que permitan conocer y caracterizar los efectos ISE. Se pretende también evaluar la eficiencia del trabajo de restructuración, así como relacionar la variación de los parámetros modales con la presencia de daño en la edificación.

En este trabajo se hace una descripción del edificio Jal, su instrumentación sísmica y características de los registros seleccionados para estudiar su respuesta sísmica. Se describen las técnicas de identificación no paramétricas y paramétricas seleccionadas y los modelos

usados con cada una de ellas con el fin de determinar tanto las propiedades del sistema como de la estructura. Para los modelos analizados se determinaron las siguientes propiedades estructurales: frecuencias naturales de vibrar, porcentajes de amortiguamientos críticos modales, factores de participación modal y formas modales.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos con cada una de las técnicas empleadas y se destacan los alcances y limitaciones del uso de éstas. A su vez se hace una discusión sobre la importancia de considerar los efectos ISE en la respuesta dinámica con base en los resultados obtenidos para los eventos analizados.

2. EL EDIFICIO JAL

2.1. Localización

El edificio Jal está ubicado en la zona de suelo blando de la ciudad de México (fig 2.1); la frecuencia dominante en este sitio es aproximadamente 0.5 Hz. El espesor del suelo arcilloso es de 31 m y los depósitos profundos se encuentran a 38.5 m de profundidad (Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001).

2.2. Descripción de la estructura original

El edificio está formado por una estructura principal de 14 niveles con un apéndice y un cuerpo anexo de tres niveles unidos en la planta del sótano y separados en los niveles restantes por una junta constructiva de 15 cm de ancho. Los tres primeros niveles están destinados a estacionamientos y los demás a oficinas (fig 2.2).

La planta típica de los estacionamientos tiene dimensiones de 20 m por 40 m incluyendo el cuerpo anexo, éstos se encuentran escalonados y comunicados mediante rampas y tienen alturas de entrepiso variables entre 2.50 m y 4.45 m. La planta típica del cuarto al decimocuarto nivel tiene forma rectangular de 20 m (componente T) por 32.45 m (componente L) y las alturas de entrepiso son constantes de 3.15 m (fig 2.3).

La estructura original es de concreto reforzado compuesta por columnas, muros de mampostería en las fachadas laterales y en el cubo de escaleras, un muro de concreto reforzado en el cubo de elevadores y losa reticular (peralte de 45 cm) como sistema de piso. Las resistencias nominales para los concretos de columnas y muros son de 300 kg/cm² en los primeros siete niveles, 250 kg/cm² en los cuatro siguientes y 200 kg/cm² para los tres restantes.

La cimentación está compuesta por un cajón de concreto reforzado con una losa reticular de 80 cm de peralte desplantado a 3.30 m de profundidad, el cual está apoyado sobre 54 pilotes de fricción de sección triangular de 60 cm de lado y 28 m de longitud, además se tienen 10 pilotes de forma cuadrada de 40 cm de lado y 26 m de longitud, cuyo extremo superior se

encuentra a 9 m de profundidad de manera que no están en contacto con el cajón de cimentación (fig 2.4).

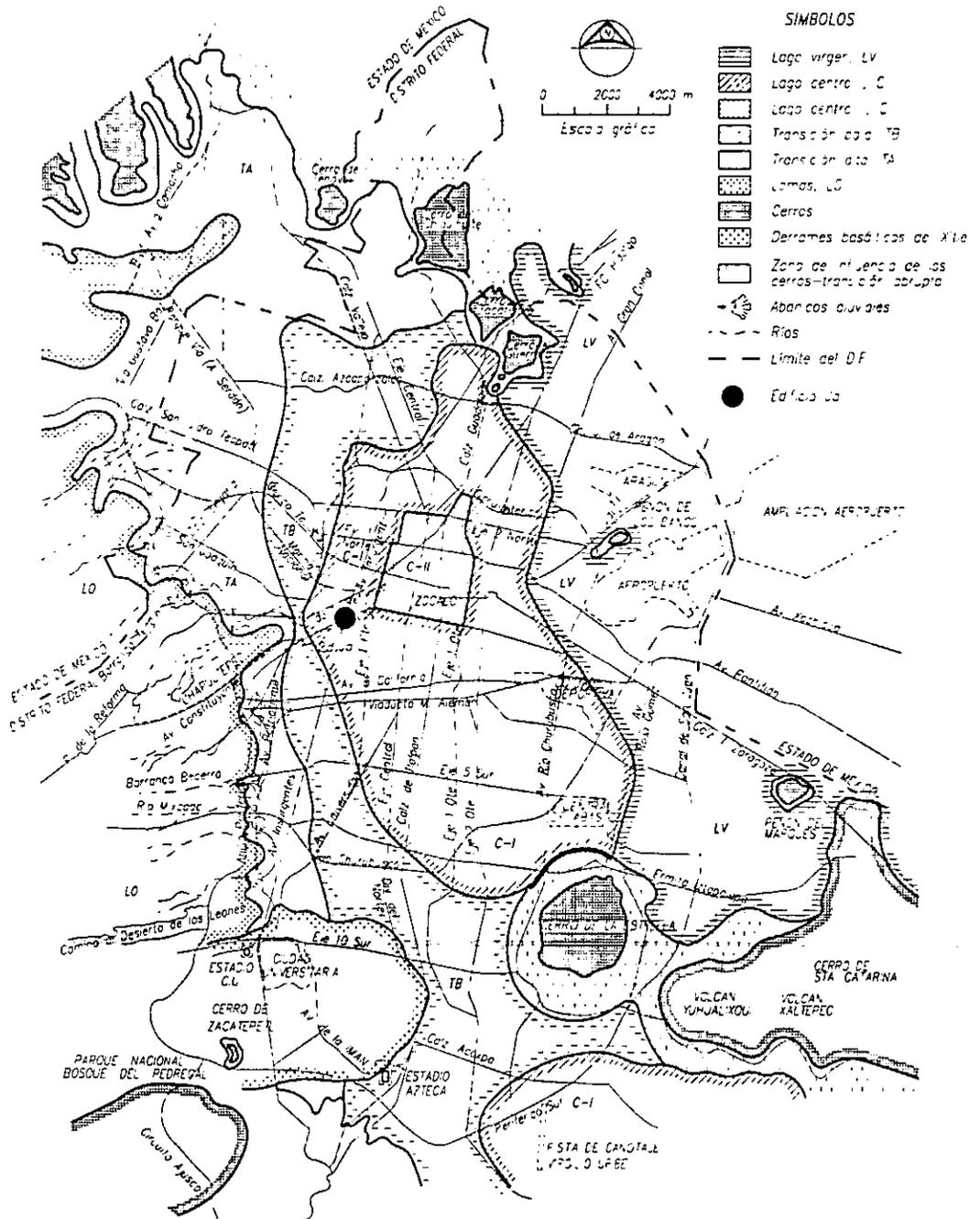
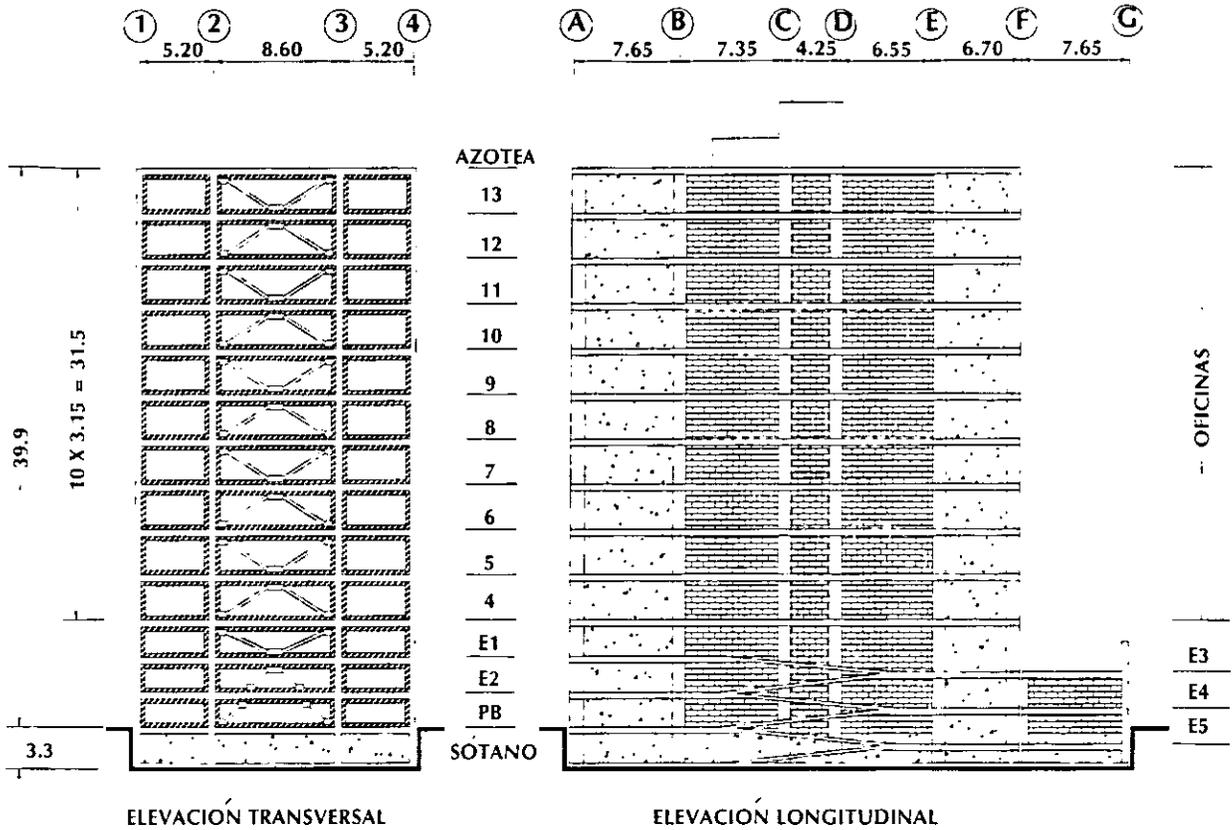


Fig 2.1. Ubicación general del edificio en la ciudad de México (zonificación geotécnica, Tamez et al, 1997)



Acotaciones en m

Fig 2.2. Elevación longitudinal y trasversal de edificio

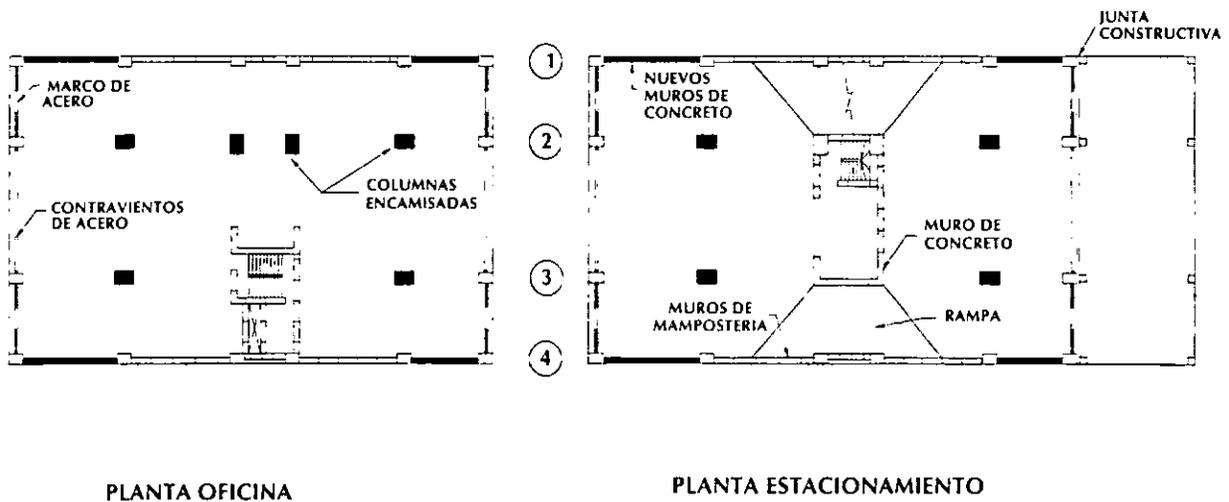
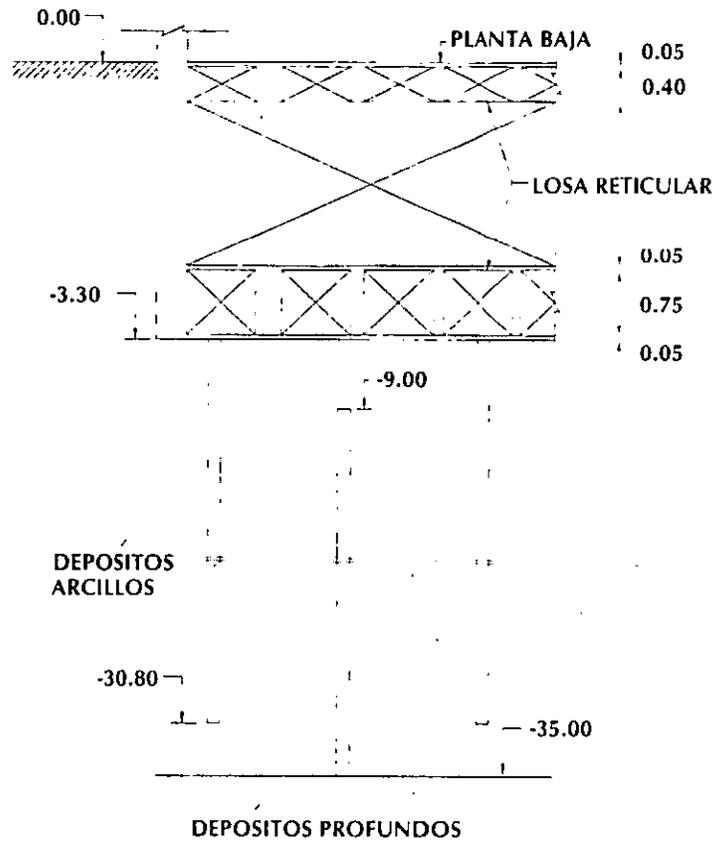
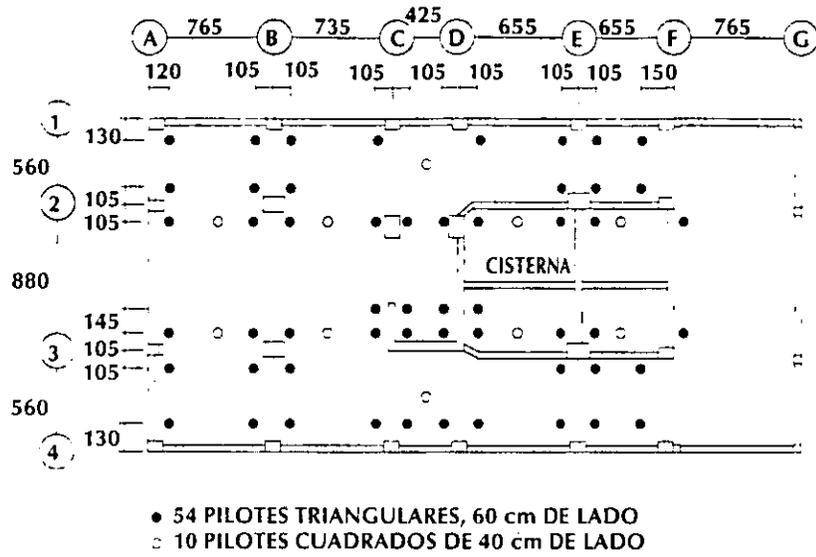


Fig 2.3. Plantas típicas de oficinas y estacionamientos



Acotaciones en cm

Fig 2.4. Cimentación del edificio

2.3. Descripción de la primera rehabilitación

Durante los sismos de septiembre de 1985 el edificio sufrió algunos daños en elementos estructurales y no estructurales, que consistieron en agrietamientos de cortante en columnas y muros de mampostería (fig 2.5). Hubo fisuras mayores de 1 mm en columnas del estacionamiento (fig 2.6) y menores en varias columnas de los demás niveles. Se presentaron además desprendimientos de material en algunas columnas del nivel siete en adelante. En el muro de concreto del cubo de elevadores también se presentaron agrietamientos menores de 1 mm en varios niveles.

Debido a los daños mencionados se procedió a hacer una primera rehabilitación, en la cual se reforzaron las columnas interiores de niveles de estacionamientos y oficinas con un encamisado de concreto reforzado de 20 cm de espesor y se construyeron muros de concreto reforzado en las crujías extremas de los marcos exteriores en el componente L, desligados de los mismos y anclados a losa en su cara superior. En 1993 se determinaron las resistencias nominales para los concretos de columnas y muros mediante pruebas no destructivas y ensayos de núcleos, éstas resultaron ser de 314 kg/cm^2 para los primeros 7 niveles y 272 kg/cm^2 para los restantes (Aire y Murià Vila, 1993).

2.4. Descripción de la segunda rehabilitación

El 10 de diciembre de 1994 ocurrió un evento sísmico (evento 94-3) que afectó al edificio, observándose daños estructurales leves y daños moderados en elementos no estructurales (agrietamientos en muros de concreto y mampostería, respectivamente), atribuibles principalmente a la acumulación de los efectos de sismos anteriores (septiembre de 1985 y abril de 1989). También fueron detectados leves agrietamientos por cortante en algunas columnas del estacionamiento probablemente debidos a asentamientos diferenciales en el cuerpo anexo.

Los daños no estructurales aumentaron con el sismo del 14 de septiembre de 1995 (evento 95-1), principalmente en columnas que antes habían presentado agrietamientos por corte. Se pusieron al descubierto fisuras de las que se tiene evidencia fueron producidas durante el evento del 25 de abril de 1989 de mayor intensidad que el 94-3 y 95-1 y habían sido

resanadas (Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001).



Fig 2.5. Daños en elementos no estructurales: agrietamiento de muros de mampostería



Fig 2.6. Daños en elementos estructurales: desplome y agrietamiento en las columnas del sótano

Los eventos de 1995 hicieron evidente el mal comportamiento del edificio ante sollicitaciones de intensidad moderada y baja, por lo que se decidió hacer una segunda rehabilitación, la

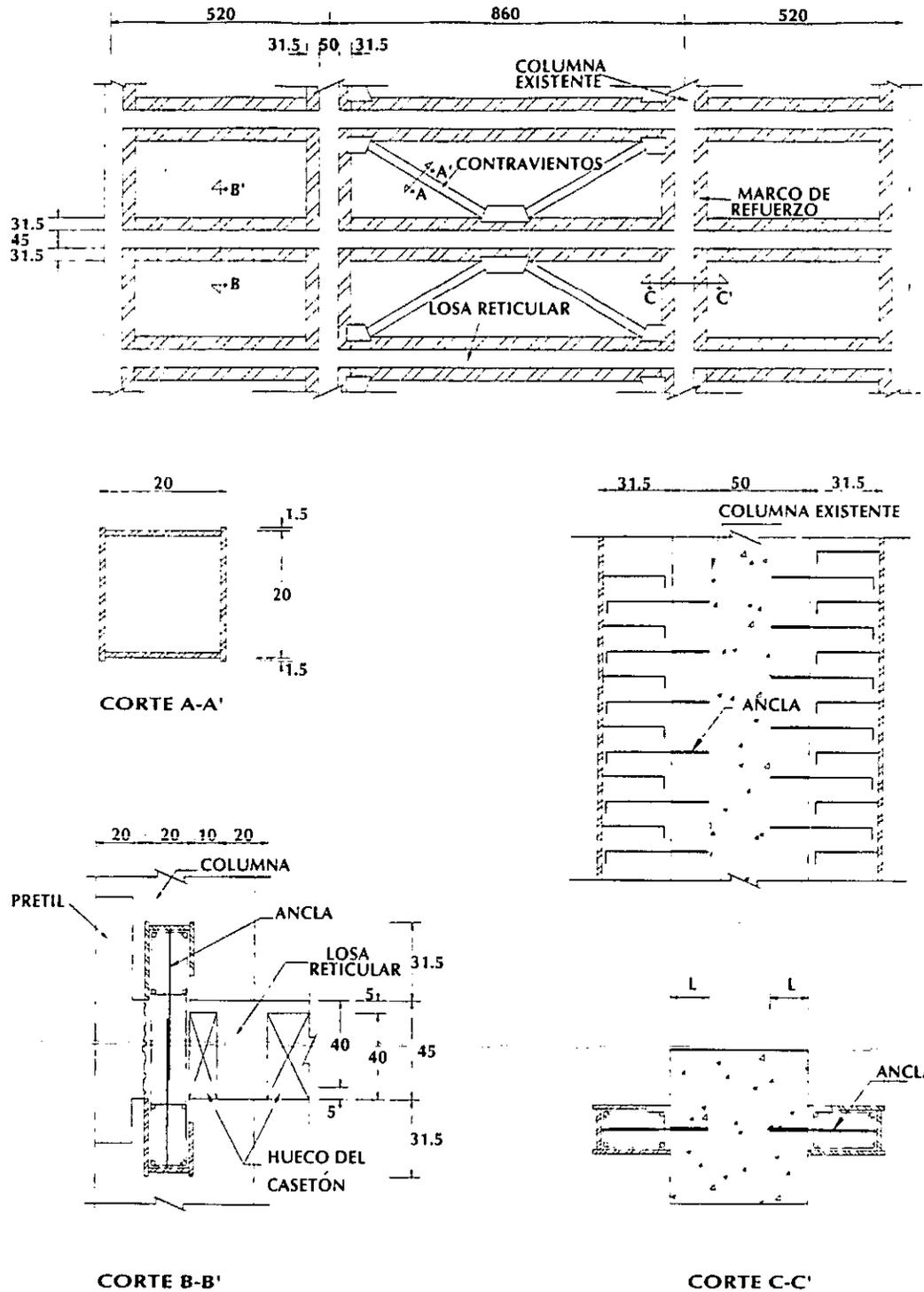
cual fue llevada a cabo entre 1996 y 1997.

Esta rehabilitación consistió en la construcción de traveses de concreto y ampliación de la sección de las columnas existentes formando marcos compuestos de concreto y acero en las fachadas en el componente T. En la crujía central se colocaron diagonales metálicas (fig 2.7). Los marcos de concreto se recubrieron con placas de acero estructural. Las grietas de muros de mampostería y columnas del estacionamiento se inyectaron con resina epóxica. Se anexó también al edificio un cuerpo metálico de escaleras de emergencia en uno de los lados en la dirección T, unido a cada uno de los niveles.

2.5. Daños posteriores

Durante los sismos ocurridos el 15 de junio de 1999 (evento 99-1) y el 30 de septiembre de 1999 (evento 99-3) se presentaron algunos daños no estructurales asociados con el desprendimiento de aplanados (fig 2.8) y agrietamientos moderados en muros de mampostería del cubo de escaleras y las fachadas laterales y daños estructurales asociados con reapertura de grietas en muros de concreto y columnas en los niveles de estacionamiento (fig 2.9), y agrietamientos nuevos en éstos (fig 2.10).

En una inspección realizada después del evento 99-1 se notó una separación en la junta entre los elementos de acero estructural (diagonales) y las interfaces concreto-concreto entre los elementos originales y los nuevos (fig 2.11). Inicialmente se creyó que era sólo un fisuramiento en la junta fría pero de los análisis no paramétricos preliminares y análisis de modelos analíticos de la respuesta estructural se confirmó que ésto era evidencia de un deslizamiento en las interfaces porque existió una pérdida de rigidez asociada al mismo (Fuentes Olivares, 2000).



Acotaciones en cm

Fig 2.7. Detalles de las diagonales de acero en la segunda rehabilitación

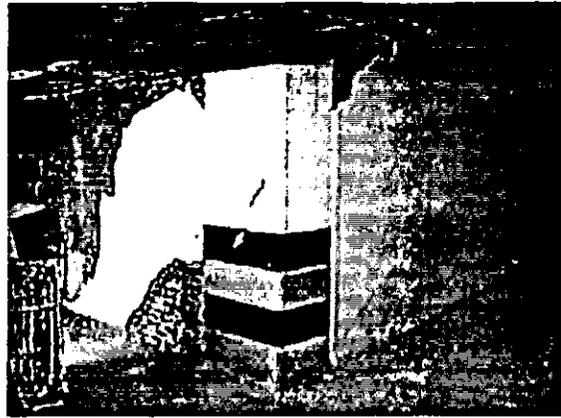
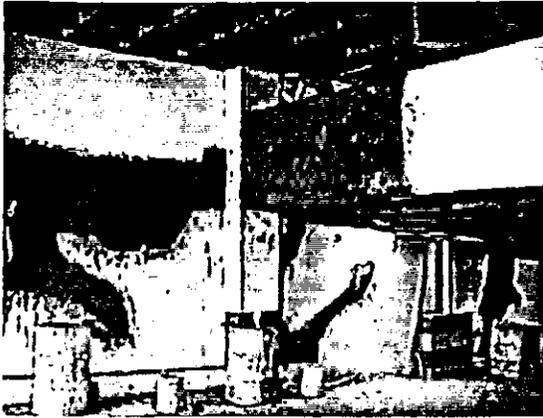


Fig 2.8. Daños en elementos no estructurales en aplanados

Fig 2.9. Reapertura de grietas existentes

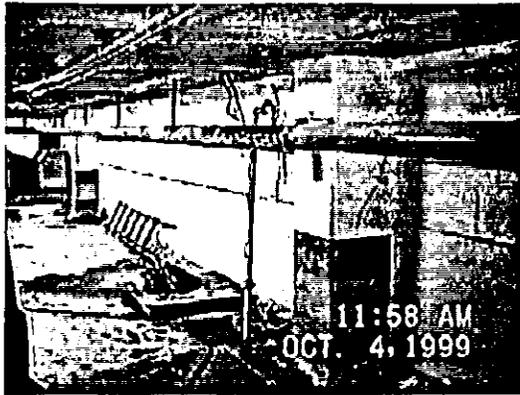


Fig 2.10. Agrietamientos en columnas del sótano

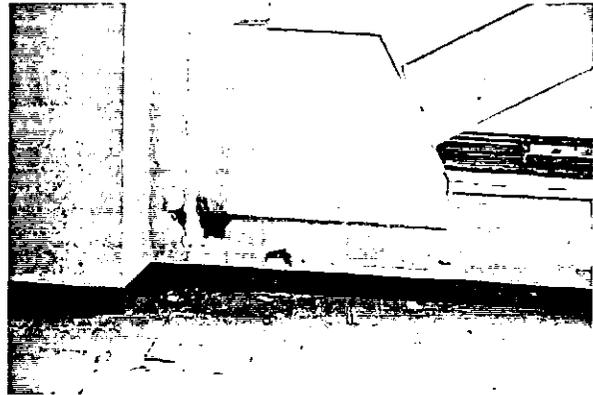


Fig 2.11. Evidencia de deslizamiento en las interfaces entre elementos nuevos y originales

3. INSTRUMENTACIÓN Y REGISTROS SÍSMICOS

3.1. Instrumentación sísmica

El edificio está instrumentado con 11 acelerógrafos en diferentes niveles y puntos de la estructura y en tres puntos en el suelo circundante, dos debajo de la superficie para conocer la amplificación de las ondas sísmicas desde los depósitos firmes profundos hacia la superficie y uno en el terreno, a 40 m del edificio.

La distribución de los 11 acelerógrafos se determinó de una forma que se pudiera detectar la vibración del edificio obteniéndose las frecuencias y formas modales del modo fundamental y modos superiores, efectos de torsión y efectos ISE. Así se tienen tres acelerógrafos en la azotea, dos en cada uno de dos niveles intermedios (nivel 11 y nivel 6) y cuatro en el sótano (fig 3.1).

Los instrumentos tienen sensores triaxiales, dos horizontales orientados para medir los movimientos de traslación en T y L del edificio correspondientes a las direcciones corta y larga, respectivamente, y uno vertical. Todos están interconectados en una configuración maestro-esclavo, que permite ponerlos en operación en un mismo instante cuando el sensor de la azotea este (AE) alcanza un umbral prefijado y sincronizar los registros mediante una señal común de tiempo. Cada aparato a su vez puede iniciar su operación en forma autónoma cuando detecta un valor de aceleración mayor que para el que está programado.

3.2. Características de los registros sísmicos

En la red acelerográfica del edificio Jal se han registrado numerosos eventos sísmicos que han sacudido a la ciudad de México desde que inició su operación en noviembre de 1992 hasta 1999 (tabla 3.1). En este trabajo se analizaron 14 registros de los eventos sísmicos más significativos ocurridos antes (93-3, 93-4, 93-11, 94-1, 94-3, 95-1, 95-2, 96-1) y después (97-1, 97-2, 98-1, 99-1, 99-2, 99-3) de la segunda rehabilitación del edificio: nueve de ellos se originaron en la costa de Guerrero, dos en la costa de Oaxaca, uno en la costa de Colima, uno en la costa de Michoacán y uno en Puebla.

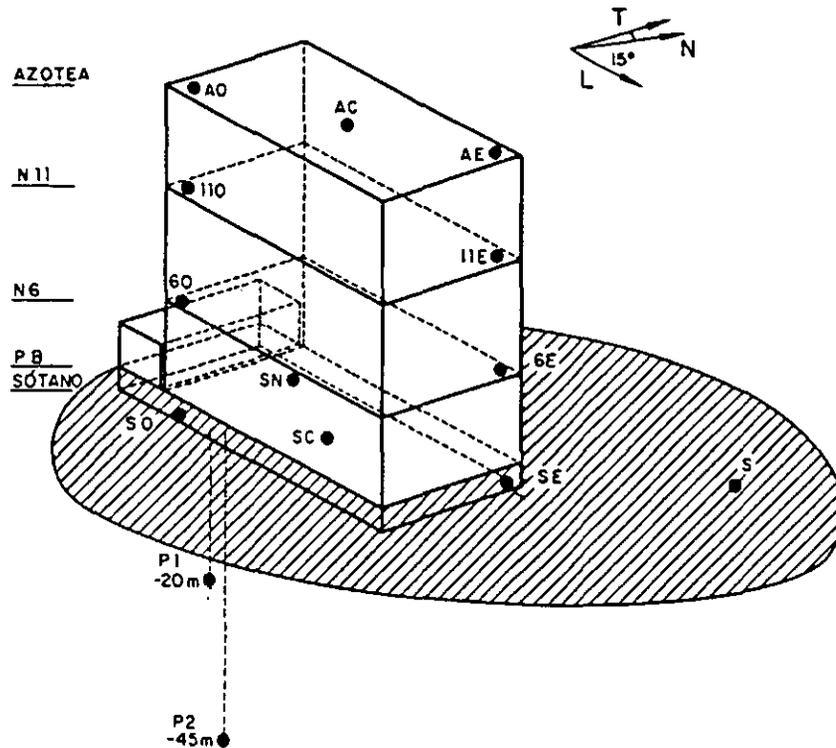


Fig 3.1. Localización de los acelerógrafos

En la tabla 3.1 aparecen las características de los sismos seleccionados: localización, fecha del evento, magnitud M_w (medida con las ondas de período largo de 20 s), la distancia epicentral, la intensidad horizontal de Arias y la aceleración máxima del terreno (S) y de la azotea del edificio en las dos componentes ortogonales de movimiento.

Las aceleraciones máximas en el terreno y en la azotea ocurrieron en los eventos 94-3, 95-1, 99-1 y 99-3. En el terreno fueron de 17, 37, 25 y 34 cm/s^2 , respectivamente y en la azotea tuvieron valores de 124, 130, 225 y 304 cm/s^2 , respectivamente. Se observa que en los eventos antes de la rehabilitación las máximas aceleraciones ocurrieron en la dirección larga y para aquellos ocurridos una vez concluida la rehabilitación de la estructura las máximas aceleraciones se presentan en la dirección corta. En estos eventos se produjeron daños visibles, estructurales y no estructurales.

Tabla 3.1. Características de los eventos sísmicos

Evento	Localización	Fecha Local	Magnitud Mw	Distancia epicentral (km)	I _{Arias} (cm/s)	A máx T		A máx L	
						Terreno (cm/s ²)	Azotea (cm/s ²)	Terreno (cm/s ²)	Azotea (cm/s ²)
93-3	Guerrero	15/05/93	6.0	318	0.3	4	8	4	10
93-4	Guerrero	15/05/93	6.1	315	1.2	8	38	8	23
93-11	Guerrero	24/10/93	6.7	303	2.8	13	35	11	56
94-1	Guerrero	23/05/94	6.3	206	0.6	7	14	5	18
94-3	Guerrero	10/12/94	6.5	280	5.4	13	49	17	124
95-1	Guerrero	14/09/95	7.5	298	19.3	35	116	37	130
95-2	Colima	09/10/95	7.9	532	4.3	12	32	8	72
96-1	Guerrero	15/07/96	6.6	291	0.7	8	16	9	33
97-1**	Michoacán	11/01/97	7.1	427	5.5	16	49	16	49
97-2*	Guerrero	22/05/97	6.5	285	0.5	5	20	6	16
98-1*	Oaxaca	03/02/98	6.3	515	0.2	4	16	4	11
99-1*	Puebla	15/06/99	6.9	222	13.7	25	225	20	86
99-2*	Guerrero	21/06/99	6.2	285	0.4	5	20	5	24
99-3*	Oaxaca	30/09/99	7.4	455	19.4	34	304	22	116

Mw Magnitud estimada con las ondas de período largo (Pacheco y Singh, 1995)

** Evento registrado con la segunda rehabilitación en proceso

* Evento registrado concluida la segunda rehabilitación

En las figs 3.2 y 3.3 se presentan los registros obtenidos en los acelerógrafos del terreno (S) y de la azotea (AC). En la figs 3.4 y 3.5 aparecen los espectros de Fourier en los dos componentes ortogonales (T y L) de los mismos registros.

Un aspecto a señalar en los espectros de Fourier de estos eventos sísmicos es que la mayor parte de la energía está localizada entre 0.2 y 2.0 Hz, característica de registros medidos en suelos blandos. Por lo tanto, será posible identificar las frecuencias de los modos de vibrar del sistema con suficiente resolución en este intervalo, pero habrá dificultad cuando las frecuencias propias del sistema se alejen de éste (modos superiores), ya que las amplitudes de las señales son pobres debido a limitaciones de resolución del sistema de captura de los acelerógrafos. Todos los registros tienen un intervalo de tiempo de 0.01 s.

En el evento 93-4, el instrumento del punto 11E tuvo un retardo de 5.76 s con relación al inicio de los registros de los demás aparatos. En el evento 95-2 el registro del instrumento ubicado en la azotea este (AE) se interrumpió en tres ocasiones, la duración acumulada de ellas fue de 9.43 s concentrados en donde el movimiento presentaba las mayores amplitudes, por lo que este registro no se usó en los análisis. En el evento 99-3 el instrumento ubicado en

el sótano norte (SN) comenzó 43.40 s después que los demás aparatos, razón por la que se descartaron estos primeros segundos del evento en los demás registros para los análisis. Cabe destacar que se logró captar la fase intensa del sismo.

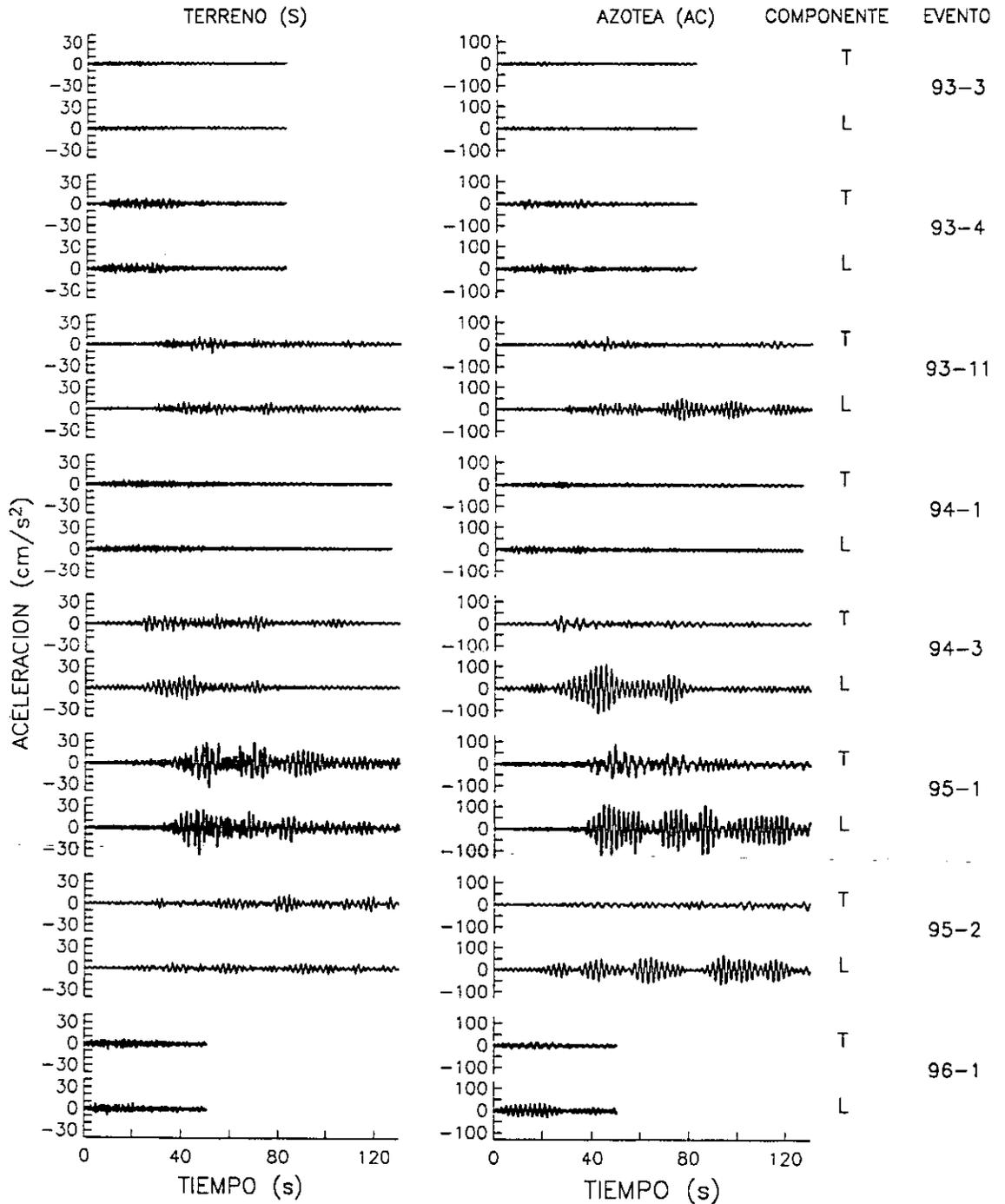


Fig 3.2. Aceleraciones medidas en los aparatos del terreno (S) y de la azotea centro (AC) durante los eventos 93-3 al 96-1

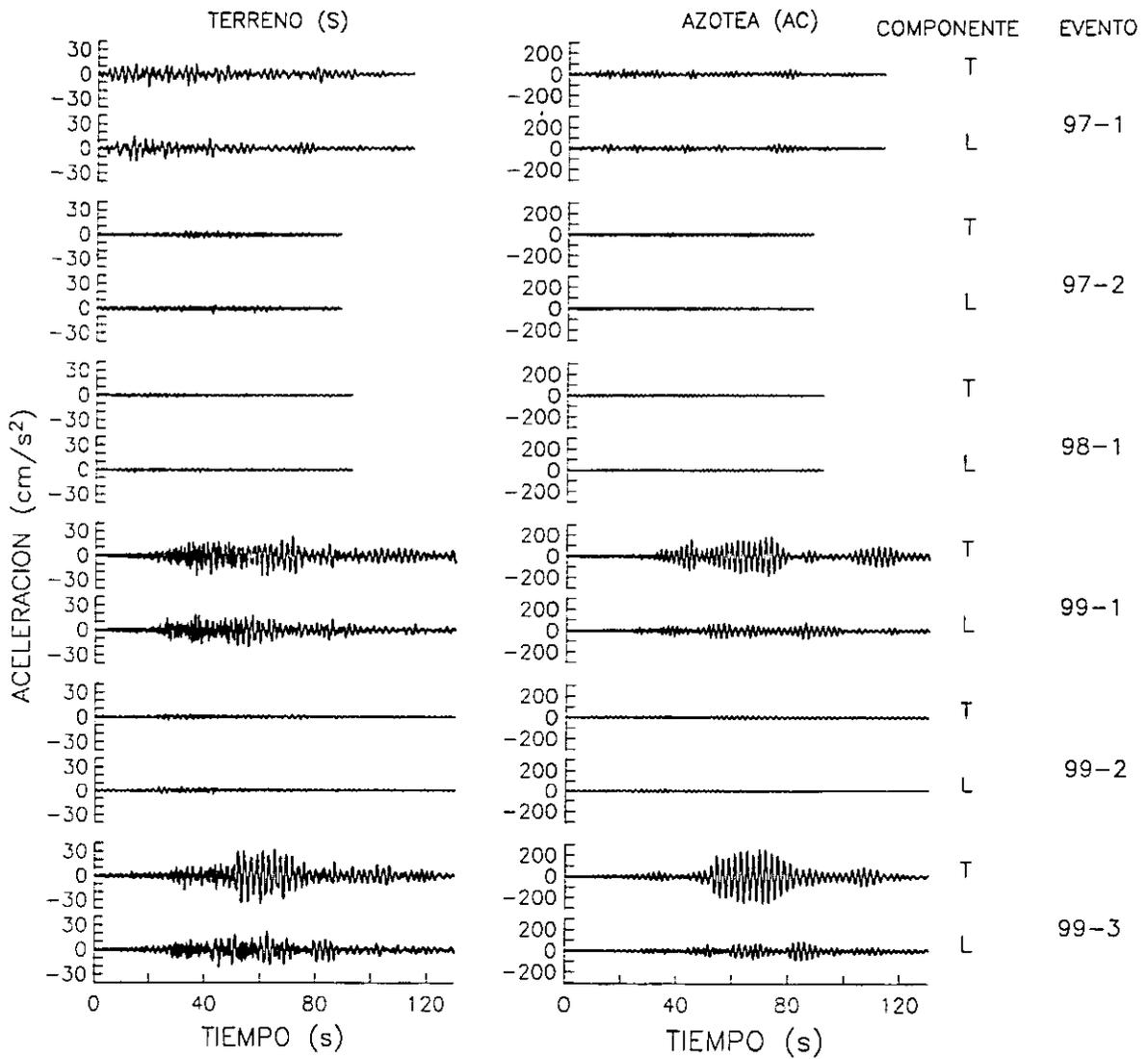


Fig 3.3. Aceleraciones medidas en los aparatos del terreno (S) y de la azotea centro (AC) durante los eventos 97-1 al 99-3

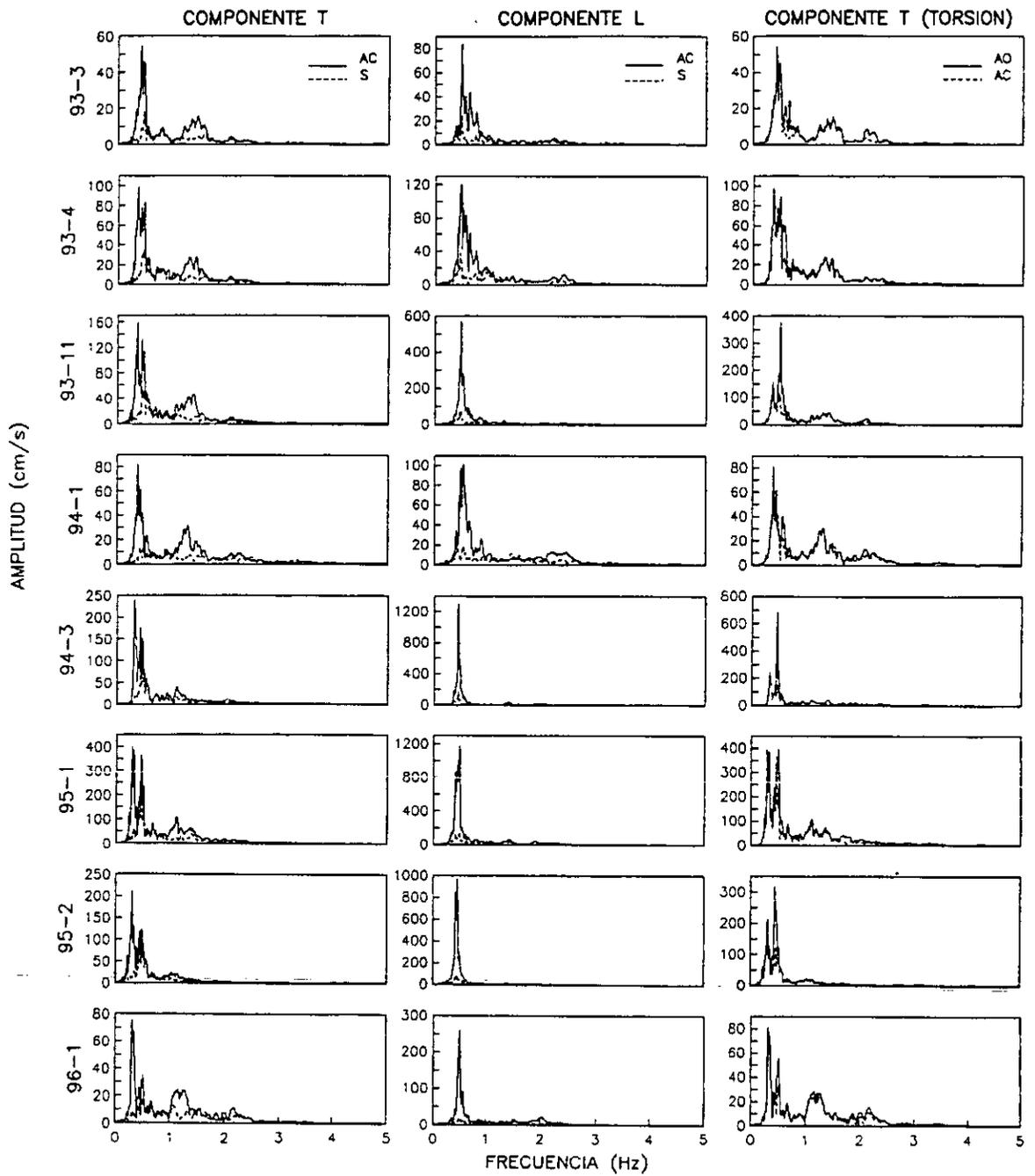


Fig 3.4. Espectros de amplitudes de Fourier de las aceleraciones medidas en los puntos S y AC de la fig 3.2

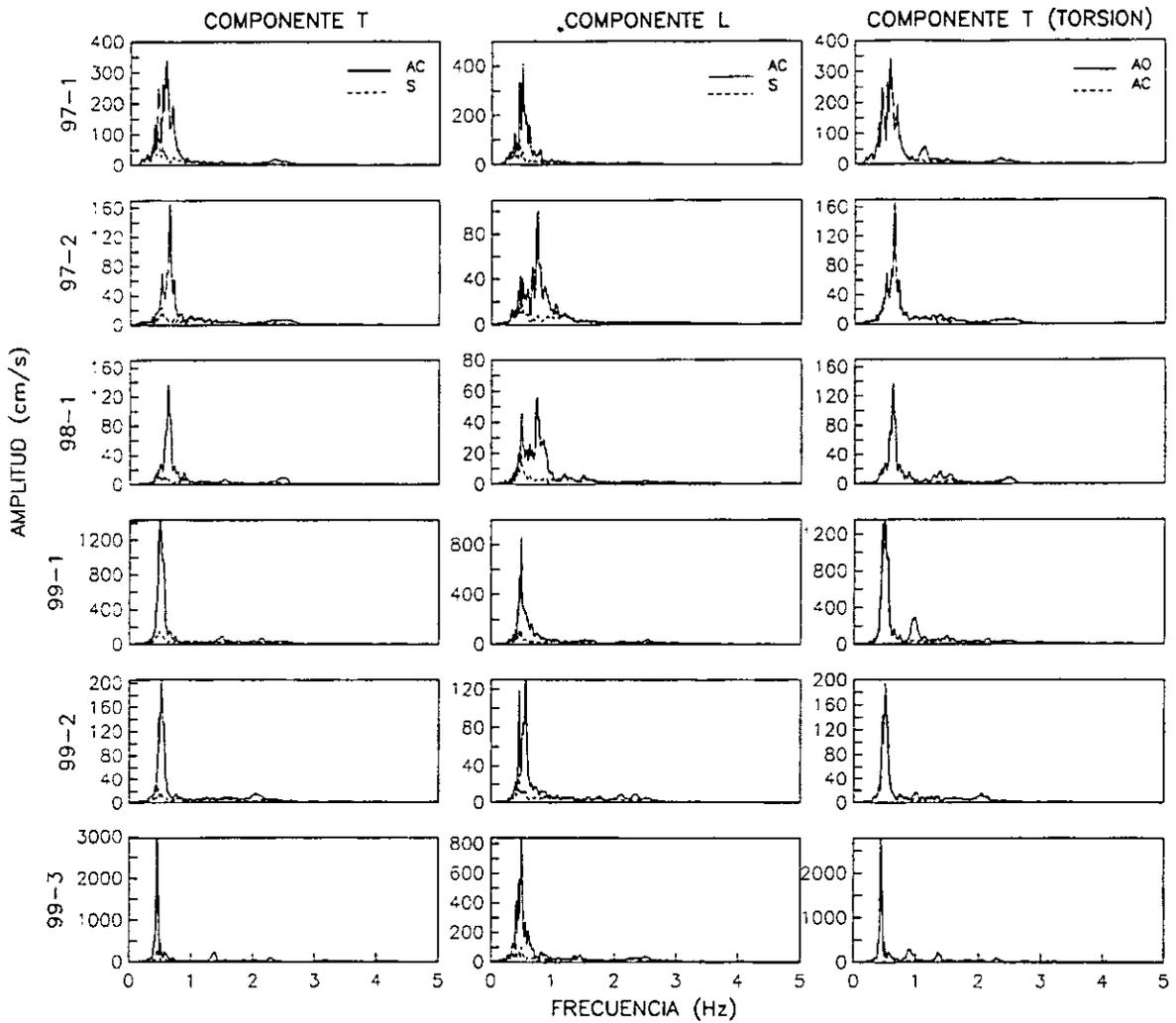


Fig 3.5. Espectros de amplitudes de Fourier de las aceleraciones medidas en los puntos S y AC de la fig 3.3

4. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN Y MODELOS

Se han desarrollado técnicas de análisis no paramétricos y paramétricos que permiten identificar las propiedades dinámicas a partir del análisis de registros sísmicos en el dominio del tiempo y la frecuencia (Ewins, 1986; Ljung, 1987; Bendat y Piersol, 1989), a través de estimativos espectrales, características frecuenciales y descomposición modal. En este trabajo se seleccionaron algunas de las más comunes que se han empleado en México, para la estimación de las principales propiedades dinámicas del edificio JAL y del sistema suelo-estructura (Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001). Para la evaluación de estas técnicas se usaron modelos previamente estudiados (Toro Jaramillo, 1997) y se propusieron nuevos modelos que relacionan diferentes señales de entrada y salida, y que permitieron caracterizar los diferentes parámetros de la respuesta estructural.

4.1. Estimación no paramétrica

La estimación no paramétrica se hace generalmente en el dominio de la frecuencia mediante funciones que relacionan diferentes señales de entrada (excitaciones a las que está sometido un sistema) y salida (respuestas del sistema). Este análisis puede hacerse de los registros sísmicos completos o divididos en segmentos (ventanas). La elección de las señales se hace de acuerdo con las propiedades dinámicas que se quieren identificar; ésto es, se selecciona la señal de excitación y de respuesta a relacionarse de acuerdo con el modelo de identificación.

4.1.1. Análisis espectral

Este método consiste en hacer un análisis espectral convencional de los registros sísmicos para obtener las propiedades dinámicas de un sistema (Bendat y Piersol, 1989).

La información en el dominio de la frecuencia se obtiene aplicando la transformada rápida de Fourier a las historias de aceleración absoluta corregida ($\ddot{x}(t)$) de acuerdo con

$$\ddot{X}(f) = \int_0^t \ddot{X}(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad 4.1$$

Esta ecuación se puede escribir como

$$\ddot{X}(f) = \int_0^t \ddot{X}(t) \cos 2\pi ft \, dt - i \int_0^t \ddot{X}(t) \operatorname{sen} 2\pi ft \, dt \quad 4.2$$

Es decir, la amplitud de Fourier $\ddot{X}(f)$ está compuesta por una parte real y una parte imaginaria

$$\ddot{X}(f) = \ddot{R}(f) - i\ddot{I}(f) \quad 4.3$$

Las ordenadas espectrales se suavizan con promedios cuadráticos móviles, para disminuir los efectos causados por el ruido instrumental y el cálculo numérico.

La amplitud suavizada para la frecuencia f , $\ddot{X}_s(f)$, se calcula como

$$[\ddot{X}_s(f)]^2 = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{f_1}^{f_2} [\ddot{X}(f)]^2 \quad 4.4$$

la suma se efectúa entre las frecuencias f_1 y f_2 , dadas por: $f_1 = f * 2^{-(1/2Fs)}$ y $f_2 = f * 2^{(1/2Fs)}$. N es el número de puntos comprendidos entre las frecuencias f_1 y f_2 y FS es el factor de suavizado.

Se calculan los espectros de potencia de cada señal de acuerdo con

$$S_{xx}(f) = \ddot{X}^*(f) \ddot{X}(f) \quad 4.5$$

donde $\ddot{X}^*(f)$ es el espectro conjugado de Fourier.

También se calculan los espectros cruzados de potencia de acuerdo con

$$S_{xy}(f) = \ddot{X}^*(f) \ddot{Y}(f) \quad 4.6$$

donde $\ddot{X}(f)$ y $\ddot{Y}(f)$ son funciones de simetría de dos señales diferentes, implica que

$$X(-f) = \dot{X}(f) \quad \text{y} \quad S_{xy}(\dot{f}) = S_{xy}(-f) \quad 4.7$$

Dada esta propiedad, es conveniente definir los espectros de potencia de la siguiente forma

$$G_{xx}(f) = \begin{cases} 2S_{xx}(f) & ; f > 0 \\ S_{xx}(f) & ; f = 0 \\ 0 & ; f < 0 \end{cases} \quad 4.8$$

$$G_{xy}(f) = \begin{cases} 2S_{xy}(f) & ; f > 0 \\ S_{xy}(f) & ; f = 0 \\ 0 & ; f < 0 \end{cases} \quad 4.9$$

Para determinar las propiedades dinámicas de un sistema se requiere tener la información de los registros a analizar en el dominio de la frecuencia. Con ésto se estiman las funciones de transferencia en amplitud (cocientes espectrales) y ángulos de fase, así como las funciones de coherencia entre dos señales.

Las funciones de transferencia se obtienen de dos formas. Una con el cociente de los auto-espectros o de los espectros de Fourier de las dos señales

$$FT = \frac{\sqrt{\overline{G_{xx}(f)}}}{\sqrt{\overline{G_{yy}(f)}}} = \frac{\ddot{X}_s(f)}{\ddot{Y}_s(f)} \quad 4.10$$

La otra con el cociente del espectro cruzado de las dos señales consideradas y el auto-espectro de una de ellas

$$FT_{xy} = \frac{G_{xy}}{G_{xx}} \quad 4.11$$

Estas funciones de transferencia son iguales sólo si las dos señales están relacionadas linealmente.

La determinación de la correlación existente entre los componentes frecuenciales de dos señales se obtiene recurriendo a la relación que hay entre las funciones del espectro cruzado

y los espectros de potencia de cada señal, a partir de las cuales se define la función de coherencia.

$$G_{xy}(f)^2 \leq G_{xx}(f) G_{yy}(f) \quad 4.12$$

$$C^2(f) = \frac{G_{xy}(f)^2}{G_{xx}(f) G_{yy}(f)} \quad 4.13$$

Según esta definición $C^2(f)$ siempre es igual a 1.

La función de coherencia de cada par de señales analizadas se evalúa dividiendo las señales por tramos iguales. Un valor adecuado puede ser segmentos de 1024 o 2048 puntos considerando que a menor número de puntos de un segmento, es menor la resolución en frecuencia y por lo tanto pueden cometerse errores numéricos en el análisis (Bendat y Piersol, 1989). Se estima el valor de los espectros de potencia y del espectro cruzado de cada segmento y con éstos el de la señal completa, que se define como

$$\hat{S}_{xx}(f) = E \left[\hat{X}_i^*(f) \hat{X}_i(f) \right] \quad 4.14$$

$$\hat{S}_{yy}(f) = E \left[\hat{Y}_i^*(f) \hat{Y}_i(f) \right] \quad 4.15$$

$$\hat{S}_{xy}(f) = E \left[\hat{X}_i^*(f) \hat{Y}_i(f) \right] \quad 4.16$$

donde E es el valor esperado.

De las ecuaciones 4.14 a 4.16 y usando las propiedades de simetría de las ecuaciones 4.8 y 4.9 se define la función de coherencia como

$$C^2(f) = \frac{|\hat{G}_{xy}(f)|^2}{\hat{G}_{xx}(f) \hat{G}_{yy}(f)} \quad \text{donde } 0 \leq C^2(f) \leq 1 \quad 4.17$$

Los valores de coherencia varían entre cero y uno. Cuando el valor de la función de coherencia es igual a uno significa que hay una relación lineal completa entre las dos señales, si es igual a cero dicha relación es nula.

El procedimiento descrito anteriormente también es útil para determinar el ángulo de fase entre dos señales con el fin de ver la sincronía existente entre los dos registros analizados. Éste se obtiene haciendo el cociente de la parte real y la parte imaginaria de la función del espectro cruzado de potencia de cada segmento y efectuando el promedio pesado de los valores individuales.

$$\hat{G}_{xy}(f) = E [A_{ixy}(f) + iB_{ixy}(f)] \quad 4.18$$

$$\hat{\theta}_{xy}(f) = E \left[\tan^{-1} \frac{B_{ixy}(f)}{A_{ixy}(f)} \right] \quad 4.19$$

Este procedimiento de análisis se implementó en un programa de cómputo (Murià Vila, Zapata Escobar y Rodríguez Gutiérrez, 1999) con base en varias subrutinas proporcionadas por Ordaz (1993), y en el desarrollo de subrutinas para el cálculo de los espectros de potencia, así como de filtrado, las funciones de transferencia (amplitud y ángulo de fase) y función de coherencia. Esta última también se incorporó en el programa DEGTRA A4 (Ordaz y Montoya, 2001). Con estos dos programas se realizaron diversas pruebas para validar los resultados obtenidos.

4.1.2. Procedimiento para estimación de las propiedades del sistema

El análisis espectral permite identificar las frecuencias, amortiguamientos y modos de vibrar del sistema. Se toman como referencia para cada componente, determinados puntos instrumentados en la estructura. Para los componentes horizontales y la torsión se necesita un instrumento en la azotea centro y un instrumento en una de las esquinas de la azotea.

El procedimiento para identificar las frecuencias de los componentes T y L relaciona las señales de la azotea centro y del terreno en el dominio de la frecuencia en el mismo

componente. Se calculan los cocientes espectrales y en éstos se seleccionan las frecuencias asociadas a las ordenadas máximas, que corresponden a las frecuencias naturales de vibrar del sistema en el componente respectivo. Para identificar las frecuencias debidas a torsión se calcula el cociente espectral entre el registro de una de las esquinas de la azotea y el de la azotea centro. Las ordenadas máximas de este cociente corresponden a las frecuencias del componente de torsión. Si se tienen dos esquinas opuestas instrumentadas, se selecciona aquella en la que se tenga el mayor brazo de torsión. Para validar las frecuencias identificadas, si se tienen instrumentos en niveles intermedios, se calculan los cocientes espectrales y se revisan las relaciones de amplitudes, ángulos de fase y coherencias entre los niveles intermedios y la azotea centro, para los componentes horizontales, y con una esquina de la azotea para la torsión. Las frecuencias identificadas además de estar asociadas a las ordenadas máximas del cociente espectral deberán tener altas coherencias.

Las fracciones de amortiguamiento crítico equivalente (h) del sistema suelo-estructura se estiman aproximadamente con el factor de amplificación dinámico, el cual corresponde a la amplitud del cociente espectral entre la azotea centro y terreno de la frecuencia fundamental del sistema. Si se cuenta con instrumentación en niveles intermedios de la estructura se puede determinar las configuraciones modales, con las amplitudes de los cocientes espectrales de las estaciones de cada nivel con respecto a la del terreno y ángulos de fase entre aquellos registros (Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001).

Este análisis espectral puede hacerse utilizando tramos secuenciales de las señales con longitud constante (ventanas), para determinar las variaciones que puedan presentarse de las propiedades identificadas durante un mismo evento (Ewins, 1986). Al tomar tramos cortos de señal (ventanas de 1024 o 2048 puntos) se pierde la resolución en frecuencia, problema que se resuelve agregando ceros al final de cada ventana.

4.1.3. Procedimiento para estimación de los efectos de interacción suelo-estructura (ISE)

Cuando un sistema estructural presenta efectos ISE su traslación total es el resultado de la suma de los movimientos de los componentes del sistema. Estos movimientos son: uno de

traslación de la base (X_o), uno de cabeceo de la base ($h_j \phi_y$) y uno de traslación de la estructura (X_j) como se indica en la fig 4.1.

Para identificar las frecuencias propias de estos movimientos, se necesita contar con una adecuada instrumentación. El número mínimo de instrumentos que se necesitan para el análisis de los efectos ISE son: un instrumento en la azotea centro, un instrumento en el centro y en las esquinas opuestas de la base y un instrumento en el terreno, en los componentes T, L y V de la estructura.

La importancia de los efectos ISE se puede determinar aproximadamente calculando los cocientes entre los registros del sótano y los del terreno en los componentes ortogonales de movimiento T, L y V, respectivamente. Estos cocientes indican si el movimiento en la base se amplifica o no respecto al del terreno y revelan la presencia de efectos ISE.

Las frecuencias debidas al cabeceo de la base se identifican calculando los cocientes espectrales de los registros de aceleración vertical en las esquinas opuestas del sótano y el registro del sótano centro y seleccionando las ordenadas máximas de estos cocientes. De acuerdo con el componente de análisis T o L se toma el registro de esquina para el cual se esté calculando el giro. Con las relaciones entre los registros de aceleración vertical medidos en las esquinas de la azotea y el registro de la azotea centro también se identifican las frecuencias debidas al cabeceo. Las ordenadas significativas de estos cocientes están relacionadas con los movimientos relativos al centro de las plantas del sótano y de la azotea, respectivamente. Para verificar que son frecuencias de cabeceo, se calculan los ángulos de fase entre los registros de las esquinas. Si las frecuencias identificadas están asociadas a ángulos de 180° aproximadamente, las amplitudes en las esquinas son de signo opuesto y asociadas a movimientos de cabeceo.

Una técnica muy usada para identificar las frecuencias de traslación de la estructura es la de cocientes espectrales entre las señales de la azotea centro y del sótano centro. Sin embargo, cuando se tiene un sistema con efectos ISE, las frecuencias que se obtienen de este cociente espectral no corresponden a las frecuencias de la estructura en base rígida, debido a que existe una dependencia entre las propiedades dinámicas del suelo y la estructura. Se han

desarrollado cocientes espectrales que relacionan combinaciones de señales que permiten una identificación de las frecuencias asociadas a cada componente del sistema suelo-estructura.

La frecuencia fundamental de traslación de la estructura con base empotrada se puede determinar de forma aproximada, a partir de un análisis espectral de la descomposición de las historias de aceleración (Paolucci, 1993; Meli et al, 1998). El análisis se realiza con los cocientes espectrales en los componentes T y L del edificio de la aceleración absoluta de la azotea centro $\left(\ddot{X}_a^{azotea} \right)$ entre la suma de las historias de aceleración de traslación horizontal de la base $\left(\ddot{X}_o \right)$, traslación en la azotea debido al cabeceo de la base $\left(\ddot{\phi}_T h \right)$ y la aceleración horizontal del terreno $\left(\ddot{X}_s \right)$ como aparece en la siguiente ecuación

$$FT_e = \frac{\ddot{X}_a^{azotea}}{\ddot{X}_o + \ddot{\phi}_T h + \ddot{X}_s} \quad 4.20$$

Se propone un procedimiento similar para identificar las frecuencias de cabeceo de la base usando una relación que permite definir como señal de excitación la suma de los movimientos de traslación del suelo, la base y la estructura y como señal de respuesta la traslación en la azotea debido al cabeceo de la base. De aquí se obtiene el cociente espectral de la ecuación 4.21

$$FT_c = \frac{\ddot{X}_a^{azotea}}{\ddot{X}_o + \ddot{X}_e + \ddot{X}_s} \quad 4.21$$

El análisis de estos cocientes espectrales puede hacerse de manera secuencial si se quieren ver variaciones de los parámetros identificados durante un evento.

Existen en la literatura numerosos estudios analíticos en los cuales se proponen modelos matemáticos para el suelo y la estructura a través de funciones de impedancia (coeficientes de rigidez). En éstos la base del edificio es idealizada como un cuerpo rígido y la estructura como un sistema de $n+2$ grados de libertad considerando que el sistema de interacción posee dos grados de libertad adicionales debido a la traslación y el cabeceo de la cimentación (Jennings y Bielak, 1973). Modelos más simplificados consideran sólo un grado de libertad para la estructura (traslación) y dos grados de libertad asociados a la traslación y el cabeceo de la base (Jennings y Bielak, 1973; Luco, 1980; Avilés y Pérez, 1996). Se han desarrollado a su vez técnicas paramétricas y procedimientos para evaluar los efectos ISE aun con ausencia de registros de terreno o de movimientos de la base (Stewart y Fenves, 1998).

De estos estudios se seleccionó una metodología para estimar estos efectos, propuesta por Luco (Luco, 1980; Luco *et al*, 1987), la que ha sido aplicada en edificios instrumentados (Luco *et al*, 1987; Mendoza *et al*, 1991; Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001).

Modelo simplificado de Luco

El sistema se idealiza según se ilustra en la fig 4.1 donde se han incorporado cinco grados de libertad, cuatro de ellos asociados a la traslación horizontal y al cabeceo de la base de la estructura en los componentes T y L y un quinto asociado con un movimiento de torsión de la base.

Los grados de libertad involucrados permiten obtener la frecuencia fundamental de traslación de la estructura con base empotrada, la de traslación de la base y la de cabeceo de la base, así como las rigideces equivalentes de cada movimiento respectivamente.

La frecuencia fundamental de vibrar del modelo de traslación del sistema suelo-estructura está dada por la relación

$$\frac{1}{f_1^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_c^2} + \frac{1}{f_H^2} \quad 4.22$$

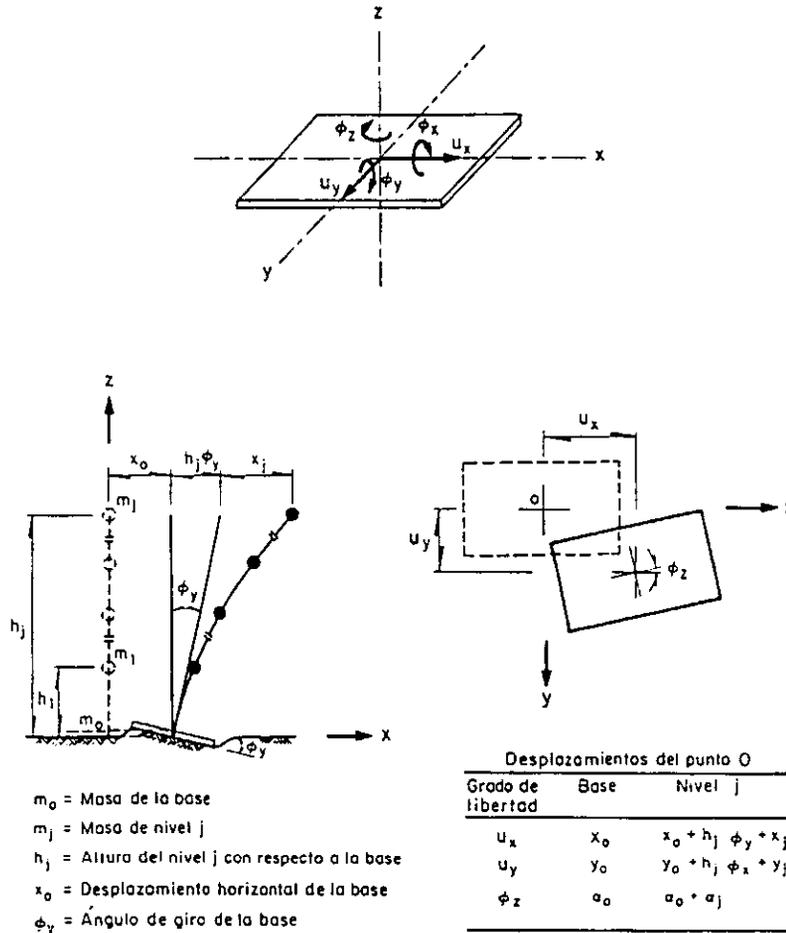


Fig 4.1. Modelo simplificado de Luco

donde

- \bar{f}_1 frecuencia fundamental del sistema determinada experimentalmente
- f_1 frecuencia de la superestructura con base empotrada
- f_c frecuencia natural suponiendo que su base sólo puede girar (cabecea) y con una superestructura infinitamente rígida
- f_H frecuencia natural suponiendo que su base sólo puede trasladarse y con una superestructura infinitamente rígida

Las frecuencias f_c y f_H se calculan con las siguientes relaciones aproximadas

$$f_c = \bar{f}_1 \cdot \gamma_1 \frac{H\phi}{X_T} \quad 4.23$$

$$f_H = \bar{f}_1 \cdot \beta_1 \frac{X_0}{X_T} \quad 4.24$$

donde

X_T respuesta total de la azotea

X_0 respuesta de traslación horizontal de la base

ϕ respuesta rotacional de cabeceo de la base

H altura de la estructura

γ_1 y β_1 parámetros modales asociados al modo fundamental de la estructura con base empotrada

$$\beta_1 = \frac{1}{M_1} \left\{ \phi^1 \right\}^T [M] \{1\} \quad 4.25$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{HM_1} \left\{ \phi^1 \right\}^T [M] \{h\} \quad 4.26$$

donde

$[M]$ matriz de masas de la estructura

M_1 masa modal del primer modo de vibrar de la estructura suponiendo base empotrada

$\{\phi^1\}$ forma modal asociada a la frecuencia fundamental de vibrar de la estructura suponiendo base empotrada. Las formas modales están normalizadas de tal manera que en el nivel de la azotea sea igual a uno

$\{h_j\}$ Altura de cada nivel con respecto a la base

De las ecuaciones 4.23, 4.24, reemplazando en la ecuación 4.22 y despejando f_1 se tiene

$$f_1 = \bar{f}_1 \sqrt{1 - \gamma_1 \frac{H\phi}{X_T} - \beta_1 \frac{X_0}{X_T}} \quad 4.27$$

Las rigideces equivalentes de traslación horizontal K_H y de cabeceo K_c asociadas a los efectos ISE pueden estimarse con las relaciones siguientes

$$K_H = \beta_1^2 M_1 (2 \pi f_H)^2 \quad 4.28$$

$$K_c = \gamma_1^2 M_1 H^2 (2 \pi f_c)^2 \quad 4.29$$

Con las ecuaciones anteriores, las características geométricas del edificio, el modelo matemático preliminar, así como la frecuencia fundamental de vibrar del sistema (\bar{f}_1) y el ángulo de giro por cabeceo de la base ϕ de los componentes T o L, se pueden evaluar los efectos ISE.

La contribución de los movimientos de traslación y cabeceo de la base en la respuesta total de traslación de la estructura puede estimarse aproximadamente con los cocientes X_0/X_T y $H\phi/X_T$, respectivamente, y la suma de estos dos cocientes representa la contribución total de los efectos ISE en la respuesta de traslación de la estructura.

La frecuencia fundamental de torsión de la estructura en base empotrada se puede obtener mediante un procedimiento similar (Luco, 1980; Luco et al, 1987), si se conoce la frecuencia fundamental de torsión del sistema suelo-estructura, las respuestas rotacionales en la base y en la azotea, y los momentos de inercia de la masa de cada nivel de la estructura.

La relación para determinar la frecuencia fundamental de vibrar del modo de torsión del sistema ISE es

$$\frac{1}{\bar{f}_T^2} = \frac{1}{f_{Tc}^2} + \frac{1}{f_R^2} \quad 4.30$$

donde

- \bar{f}_{1t} frecuencia fundamental de torsión del sistema suelo-estructura
- f_{1t} frecuencia de torsión de la estructura con base empotrada
- f_R frecuencia de torsión del sistema, si la estructura fuera infinitamente rígida y su base sólo pudiera girar en su plano

Estas frecuencias pueden calcularse con

$$f_R = \bar{f}_{1t} \cdot \sqrt{\beta_1 \frac{\phi_{bt}}{\phi_R}} \quad 4.31$$

$$f_{1t} = \bar{f}_{1t} \cdot \sqrt{1 - \beta_1 \frac{\phi_{bt}}{\phi_R}} \quad 4.32$$

donde

- ϕ_{bt} respuesta rotacional media de la losa de la base en su plano
- ϕ_R respuesta rotacional media de la losa de la azotea en su plano

Las respuestas rotacionales ϕ_{bt} y ϕ_R se obtienen de la diferencia de los registros de las esquinas este y oeste de los niveles del sótano (SE y SO) y de la azotea (AE y AO) en el componente T, dividida por la distancia entre estos dos puntos. La contribución de la respuesta de torsión en la azotea asociada a los efectos ISE se puede estimar aproximadamente con el cociente $\frac{\phi_{bt}}{\phi_R}$.

La rigidez equivalente de torsión (K_R), se calcula de acuerdo con

$$K_R = \beta_1^2 I_1 (2\pi \bar{f}_{1t})^2 \quad 4.33$$

Para este caso el parámetro β_1 está definido por

$$\beta_1 = \frac{1}{I_1} \sum_{j=1}^N I_{zj} \phi_1^j \quad 4.34$$

donde

$$I_1 = \sum_{j=1}^N I_{zj} (\phi_1^j)^2$$

I_1 momento de inercia de la masa modal de la estructura

I_{zj} momento de inercia de la masa del nivel

4.2. Estimación paramétrica

4.2.1. Ajuste de un modelo lineal de un grado de libertad (FTcal)

Esta técnica paramétrica en el dominio de la frecuencia propuesta por Rinawi y Clough (1992) se basa en plantear la ecuación de movimiento suponiendo que cada modo de vibrar de la estructura es un sistema de un grado de libertad.

$$\ddot{y} + 2\omega_n \zeta_n \dot{y} + \omega_n^2 y = P_n e^{i\omega t} \quad 4.35$$

donde

ζ_n fracción de amortiguamiento crítico del modo particular n

ω_n frecuencia natural del modo particular n (rad/s)

p_n factor de participación del modo n

$e^{i\omega t}$ excitación armónica

El método consiste en ajustar una curva definida por tres parámetros que son: frecuencia, amortiguamiento y factor de participación de cada modo identificado en la función de transferencia experimental de manera que cada ordenada máxima en dicha función corresponda a la frecuencia de cada modo principal de vibrar de la estructura.

Para una frecuencia dada, la amplitud del estado estacionario de la respuesta está dada por

$$A_k = \frac{P_n}{\sqrt{(\omega_n^2 - \Omega_k^2)^2 + (2\omega_n \zeta_n \Omega_k)^2}} = \frac{P_n}{D_k} \quad 4.36$$

En la cual los parámetros desconocidos son: ξ_n , ω_n y P_n .

La ecuación 4.36 es válida para funciones de transferencia que relacionan una aceleración de entrada con un desplazamiento relativo de salida.

La función de transferencia analítica que relaciona la entrada y la salida en términos de las aceleraciones absolutas del suelo y del oscilador es

$$A_k = \frac{P_n \omega_n \sqrt{\omega_n^2 4 \zeta_n^2 \Omega_k^2}}{(\omega_n^2 - \Omega_k^2)^2 + (2\omega_n \zeta_n \Omega_k)^2} = \frac{P_n \omega_n \sqrt{\omega_n^2 4 \zeta_n^2 \Omega_k^2}}{D_k} \quad 4.37$$

Para amortiguamientos chicos se tiene una función de transferencia aproximada que relaciona la entrada y la salida en términos de las aceleraciones absolutas del suelo y del oscilador a partir de la función de transferencia de la ecuación 4.36

$$A_k = \frac{P_n \omega_n^2}{(\omega_n^2 - \Omega_k^2)^2 + (2\omega_n \zeta_n \Omega_k)^2} = \frac{P_n \omega_n^2}{D_k} \quad 4.38$$

Si se quiere relacionar un par de señales diferentes, la amplitud A_k debe escalarse por la adecuada potencia de ω_n .

Transformando la ecuación 4.35 se llega a

$$A_k^3 x_1 + A_k^3 \Omega_k^2 x_2 + A_k x_3 = -A_k^3 \Omega_k^4 \quad 4.39$$

Donde

$$\begin{aligned} x_1 &= \omega_n^4 \\ x_2 &= 4\zeta_n^2 \omega_n^2 - 2\omega_n^2 \\ x_3 &= P_n^2 \end{aligned} \quad 4.40$$

Para un barrido de frecuencias Ω_k , con $k=1,N$; la ecuación 4.39 puede escribirse como

$$\begin{bmatrix} A_1^3 & A_1^3 \Omega_1^2 & -A_1 \\ A_2^3 & A_2^3 \Omega_2^2 & -A_2 \\ A_3^3 & A_3^3 \Omega_3^2 & -A_3 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ A_N^3 & A_N^3 \Omega_N^2 & -A_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -A_1^3 \Omega_1^4 \\ -A_2^3 \Omega_2^4 \\ -A_3^3 \Omega_3^4 \\ \cdot \\ -A_N^3 \Omega_N^4 \end{Bmatrix} \quad 4.41$$

La ecuación 4.41 es de la forma $Ax = B$

El ajuste se hace por un método de mínimos cuadrados modificado en el cual se llega a un sistema lineal de tres ecuaciones con tres incógnitas a partir de una ecuación de tercer orden de la siguiente manera

$$A^T A x = A^T B \quad 4.42$$

expresando la ecuación 4.41 matricialmente se tiene

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N A_k^6 & \sum_{k=1}^N A_k^6 \Omega_k^2 & -\sum_{k=1}^N A_k^4 \\ \sum_{k=1}^N A_k^6 \Omega_k^2 & \sum_{k=1}^N A_k^6 \Omega_k^4 & -\sum_{k=1}^N A_k^4 \Omega_k^2 \\ -\sum_{k=1}^N A_k^4 & -\sum_{k=1}^N A_k^4 \Omega_k^2 & \sum_{k=1}^N A_k^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\sum_{k=1}^N A_k^6 \Omega_k^4 \\ -\sum_{k=1}^N A_k^6 \Omega_k^6 \\ \sum_{k=1}^N A_k^4 \Omega_k^4 \end{Bmatrix} \quad 4.43$$

De la solución de este sistema se obtienen los parámetros mencionados para cada ordenada de la función de transferencia que corresponda a un modo de vibrar

$$\begin{aligned} \omega_n &= (x_1)^{1/4} \\ \zeta_n &= \sqrt{\frac{x_2}{4\omega_n^2} + \frac{1}{2}} \\ P_n &= \sqrt{x_3} \end{aligned} \quad 4.44$$

4.2.2. Estimación paramétrica modal (EP)

Para estimar los parámetros estructurales se utilizó el programa de cómputo MIMO (*Multiple Input-Multiple Output*) especializado en la estimación de propiedades de sistemas dinámicos con múltiples señales (registros sísmicos) de entrada y salida de edificios instrumentados (Li y Mau, 1990). El programa se basa en el método de superposición modal propuesto por Beck y Jennings (1980), el cual plantea la descomposición modal de un sistema de múltiples grados de libertad. En éste se transforma el sistema de ecuaciones diferenciales de movimiento acopladas de N grados de libertad, en un conjunto de N ecuaciones diferenciales desacopladas de segundo orden correspondientes a los modos clásicos de vibrar. La respuesta del sistema estructural se representa como una superposición de un número de modos dominante (NM), que puede ser menor que el número de grados de libertad totales de la estructura.

Los parámetros del sistema se determinan comparando y ajustando las respuestas calculadas con el modelo lineal y las medidas experimentalmente mediante el método de mínimos cuadrados dentro de una ventana de tiempo considerada para el análisis en la que el sistema se supone tiene un comportamiento lineal. Los parámetros que se identifican con este planteamiento son los parámetros estructurales óptimos de cada modo que reproducen la respuesta estructural: frecuencia, fracción de amortiguamiento crítico, factor de participación modal con respecto a cada una de las excitaciones impuestas, configuración modal, velocidad inicial y desplazamiento inicial.

Para un sistema cuya entrada corresponde a la aceleración medida en la base y cuya salida es el desplazamiento relativo en algún punto de la estructura, la ecuación desacoplada del movimiento para cada modo de vibrar es

$$\ddot{X}^{(r)} + a_2^{(r)} \dot{X}^{(r)} + a_1^{(r)} X^{(r)} = -a_3^{(r)} \ddot{Z}(t) \quad 4.45$$

y los valores de desplazamiento y velocidad inicial para cada modo están dados por

$$X_{(i)}^{(r)} = a_4^{(r)}, \quad \dot{X}_{(i)}^{(r)} = a_5^{(r)} \quad 4.46$$

donde

- $a_1^{(r)} = \omega_r^2$ frecuencia modal
- $a_2^{(r)} = 2\zeta_r \omega_r$, ζ_r es la fracción de amortiguamiento crítico
- $a_3^{(r)} = P_r$ factor de participación modal efectiva para el modo r en el punto de medición
- $a_4^{(r)}$ contribución del modo r al desplazamiento inicial
- $a_5^{(r)}$ contribución del modo r a la velocidad inicial
- \ddot{Z} es el registro de aceleración en la base en la componente especificada
- X es el desplazamiento modal con respecto a la base en la componente especificada

La respuesta modal en términos de desplazamiento es una función del tiempo y de cinco parámetros como se indica

$$X(t; a^{(1)}, \dots, a^{(NM)}) = \sum_{r=1}^{NM} X^{(r)}(t, a^{(r)}) \quad 4.47$$

Los parámetros a ser estimados son

$$a^{(r)} = [a_1^{(r)}, a_2^{(r)}, a_3^{(r)}, a_4^{(r)}, a_5^{(r)}]^T, \quad r = 1, 2, \dots, NM \quad 4.48$$

Los anteriores parámetros se encuentran partiendo de unos valores iniciales propuestos, a través de la minimización de la siguiente función que evalúa el error cuadrático de la diferencia de las respuestas del modelo matemático con las del sistema real

$$J(a^{(1)}, \dots, a^{(NM)}) = k_1 v_1 \int_{t_i}^{t_f} (x_o - X)^2 dt + k_2 v_2 \int_{t_i}^{t_f} (v_o - \dot{X})^2 dt + k_3 v_3 \int_{t_i}^{t_f} (a_o - \ddot{X})^2 dt \quad 4.49$$

En la expresión anterior, x_o , v_o y a_o representan los registros de desplazamiento, velocidad y aceleración relativos, respectivamente. Los valores de k_1 , k_2 y k_3 , pueden valer 0 o 1, y se seleccionan según el componente de respuesta estructural (desplazamiento, velocidad o aceleración) que quiera usarse en el análisis. v_1 , v_2 y v_3 son parámetros que normalizan cada

integral. t_i y t_f es el tiempo inicial y final de un registro para el cual quiere hacerse el análisis.

El método para la minimización de J se lleva a cabo en cuatro pasos: barrido modal, minimización de un modo, minimización unidimensional y evaluación numérica de J .

El barrido modal consiste en ir agregando un modo a la respuesta mientras se mantienen fijos los parámetros para los demás modos. Se hace la minimización de J respecto al primer modo y una vez que se tiene la convergencia de éste, se proponen parámetros iniciales para un siguiente modo mientras se mantienen fijos los parámetros del anterior y se siguen agregando modos sucesivamente hasta que el valor de J sea inferior a un límite especificado o hasta que se haya completado un cierto número de modos.

Para un modo r en particular se minimiza J con respecto a los cinco parámetros mencionados anteriormente. Los más importantes a determinar son $a_1^{(r)}$ y $a_2^{(r)}$ ya que debido a la linealidad de modelo, la minimización de $a_3^{(r)}$, $a_4^{(r)}$ y $a_5^{(r)}$ puede ser expresada en función de los dos primeros (Beck, 1978).

Para minimizar J respecto a $a_1^{(r)}$ y $a_2^{(r)}$ se recurre a un proceso iterativo de minimizaciones unidimensionales en el cual primero se minimiza J respecto a $a_1^{(r)}$, manteniendo fijo $a_2^{(r)}$, y luego con respecto a $a_2^{(r)}$, manteniendo fijo $a_1^{(r)}$. Las minimizaciones unidimensionales se hacen encontrando el mínimo de una parábola que encierra ese valor.

Después de hacer el barrido para los NM modos, se tiene una nueva estimación de los parámetros estructurales. El método converge al valor mínimo local más cercano a los parámetros iniciales propuestos, por lo que éstos son muy importantes para la precisión de la estimación.

El programa MIMO, permite analizar sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas. En éste, los registros de respuesta medidos en el sistema estructural se denotan por a_{oi} , donde $i = 1, 2, \dots, n$, y los de excitación por a_{gk} , donde $k = 1, 2, \dots, m$, n es el número de respuestas y m es el número de excitaciones. Se considera que la respuesta a_{oi} representa las aceleraciones relativas del sistema con respecto a las de la excitación a_{gk} . La aceleración calculada a_i puede

expresarse en términos de sus respuestas modales \ddot{u}_j mediante la siguiente ecuación

$$a_i = \sum_j^n \phi_{ij} \ddot{u}_j \quad 4.50$$

donde \ddot{u}_j representa las respuestas modales y ϕ_{ij} es el componente de la forma modal del modo j en la respuesta i .

Las respuestas modales se definen por la ecuación de segundo orden para sistemas con amortiguamiento clásico

$$\ddot{u}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{u}_j + \omega_j^2 u_j = \sum_k^m p_{jk} a_{gk} \quad 4.51$$

donde ζ_j es la fracción de amortiguamiento crítico del modo j , ω_j es la frecuencia circular natural del modo j en rad/s, p_{jk} es el factor de participación del modo j con respecto a la excitación k y a_{gk} es la aceleración de la excitación k .

La solución de la ecuación anterior se puede expresar en términos de la integral de Duhamel, con la que se puede obtener la solución analítica para la función de excitación $a_{gk}(t)$, suponiendo que se representa por segmentos lineales sucesivos espaciados cada intervalo de tiempo de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \ddot{u}_j = & e^{-\zeta_j \omega_j t} \left\{ [-2\zeta_j \omega_j \dot{u}_j(0) - \omega_j^2 u_j(0)] \cos \omega_{dj} t + \frac{1}{\omega_{dj}} [-\omega_j^2 (1 - 2\zeta_j^2) \dot{u}_j(0) + \zeta_j \omega_j^3 u_j(0)] \operatorname{sen} \omega_{dj} t \right\} \\ & + \sum_k p_{jk} \left\{ a_{gk}(t) + \frac{1}{\omega_{dj}} \int_0^t a_{gk}(\tau) e^{-\zeta_j \omega_j (t-\tau)} [-2\zeta_j \omega_j \omega_{dj} \cos \omega_{dj} (t-\tau) - \omega_j^2 (1 - 2\zeta_j^2) \operatorname{sen} \omega_{dj} (t-\tau)] d\tau \right\} \end{aligned} \quad 4.52$$

donde ω_{dj} es la frecuencia circular amortiguada, $\dot{u}_j(0)$ es la velocidad modal inicial y $u_j(0)$ es el desplazamiento modal inicial.

$$\omega_j = \sqrt{1 - \zeta_j^2} \quad 4.53$$

El programa MIMO identifica los parámetros modales ω_i , ξ_j , ρ_{ik} , $u_j(0)$, $\dot{u}_j(0)$ y ϕ_{ij} mediante un proceso de iteración como el que se explicó anteriormente proponiendo valores iniciales de estos parámetros y utilizando el método de mínimos cuadrados para minimizar la función criterio J , la cual es una función integral que evalúa el error cuadrático de la diferencia de las respuestas del modelo matemático con las del sistema real e indica como es el ajuste entre dichas respuestas. Dicha función representa un índice de error absoluto y está dada por

$$J = \sum_i \sum_s \{a_{oi}(s\Delta t) - a_i(s\Delta t)\}^2 \quad 4.54$$

En esta expresión la sumatoria en el tiempo se lleva a cabo en intervalos de tiempo constantes Δt . El símbolo s representa el número de intervalo de tiempo.

Cuando el proceso de identificación ha concluido se obtienen otros índices de error relativos a J , a nivel global y para cada registro, con el fin de evaluar la bondad del ajuste de las respuestas (Li y Mau, 1990).

El error relativo total correspondiente a J se define como

$$E = \frac{\sum_i \sum_s [a_{oi}(s\Delta t) - a_i(s\Delta t)]^2}{\sum_i \sum_s [a_{oi}(s\Delta t)]^2} \quad 4.55$$

El error relativo para cada registro de respuesta es

$$E_i = \frac{\sum_s [a_{oi}(s\Delta t) - a_i(s\Delta t)]^2}{\sum_s [a_{oi}(s\Delta t)]^2} \quad 4.56$$

Los índices de error permiten evaluar los resultados obtenidos en la identificación.

El programa también calcula un índice que representa la contribución de cada modo estimado en cada una de las respuestas. La contribución del modo j en la respuesta i se puede expresar como

$$R_{ij} = \frac{\sum_s \left[\phi_{ij} \ddot{u}_j(s\Delta t) \right]^2}{\sum_s a_{0i}^2(s\Delta t)} \quad 4.57$$

Los pasos a seguir para llevar a cabo el proceso de identificación son los siguientes:

- Definir el modelo a usar según sean las frecuencias que se quieren identificar. Ésto es, seleccionar las señales de excitación y de respuesta a relacionar con el fin de identificar los parámetros del sistema que mejor ajustan las respuestas calculadas con las respuestas medidas, según el componente de análisis y el tipo de movimiento. Las repuestas deben medirse relativas a las excitaciones.
- Determinar el tamaño de la ventana de análisis para captar adecuadamente las variaciones de frecuencia teniendo cuidado de que aquella sea de un tamaño tal que permita identificar con adecuada resolución la frecuencia fundamental, ya que si la ventana es demasiado pequeña puede perderse. Se recomienda que el tamaño de la ventana sea por lo menos 3 veces el período de la estructura (Pérez, 1995).
- Preparar el archivo de datos para el programa MIMO el cual contiene: el número de modos a analizar, intervalo de tiempo de los registros, número de respuestas, número de excitaciones, longitud de la ventana que se va a analizar, punto de inicio de la ventana y número de parámetros fijos cuando se analizan modos superiores. Los valores iniciales de los parámetros para el primer evento son los que resultan de análisis previos ya sea de pruebas vibración ambiental o de un análisis espectral. Cuando se analizan las señales por ventanas sucesivas los parámetros iniciales para la ventana en análisis son los de la ventana precedente.

- Identificar un modo a la vez. Cuando éste converge, se fijan sus parámetros y se agregan los datos iniciales de un siguiente modo. Se van añadiendo tantos modos como sean necesarios para tener una adecuada convergencia en las respuestas. Un criterio que permite determinar qué tan buena es la aproximación de las respuestas es que la que la suma de los porcentajes de participación de cada modo en la respuesta se aproxime al cien por ciento. De la identificación de cada modo se obtiene para cada ventana las siguientes propiedades: frecuencias naturales con sus respectivas fracciones de amortiguamiento crítico, formas modales, factores de contribución de la respuesta en cada modo y errores.
- Verificar la concordancia entre los parámetros identificados, es decir, revisar que las formas modales representen adecuadamente el modo estimado, que los valores de amortiguamiento sean razonables para este tipo de estructura y que los errores de ajuste entre las respuestas sean aceptables. Cuando los errores son superiores al 80 por ciento, no se reproducen bien las respuestas medidas a partir de las excitaciones consideradas.

Modelos para estimación de las propiedades del sistema

En el análisis paramétrico se utilizaron varios modelos, de uno y varios grados de libertad, planos y tridimensionales que habían sido previamente estudiados y validados (Toro Jaramillo, 1997) para modelar las respuestas de traslación en las dos direcciones ortogonales y la torsión en el edificio. Estos modelos fueron seleccionados con base en los criterios de mayor importancia para la adecuada convergencia del método como son: los efectos de acoplamiento entre los diferentes componentes del edificio, el número de modos que permite identificar el modelo, los índices de error obtenidos y los tiempos de procesamiento en la identificación, así como los efectos ISE en la respuesta del sistema.

Los modelos planos se consideraron en el análisis de la respuesta de traslación en el componente L y los modelos tridimensionales para el análisis de la respuesta de traslación en el componente T y la torsión del edificio. Cabe anotar que los modelos tridimensionales consideran el acoplamiento existente entre los modos de traslación y torsión en el componente T.

Las respuestas y excitaciones consideradas en los modelos se refieren a diferentes tipos de movimiento: traslación, torsión y cabeceo. Estos movimientos se definen con base en los registros tomados en los puntos instrumentados del edificio de la siguiente manera:

- Los movimientos de traslación en los dos componentes ortogonales se calculan como el promedio (suma de las aceleraciones dividida entre dos) de las señales de traslación medidas en cada nivel y en el componente respectivo. La respuesta para el modelo es la traslación relativa a la excitación que se considere.
- Los movimientos de torsión se calculan como la diferencia de los registros de las esquinas opuestas en el componente de traslación de la dirección más larga dividida entre dos.
- Los movimientos de cabeceo en la base se calculan como la diferencia de los registros verticales tomados en los extremos de la planta del sótano para cada componente dividida entre dos.

La nomenclatura para nombrar los modelos es la siguiente:

- Las dos primeras posiciones indican el número de niveles en donde se consideran las respuestas (1N,2N,3N,...,XN).
- Las dos posiciones siguientes indican el número de respuestas consideradas (1G,2G,3G,...,XN).
- Las últimas posiciones indican las excitaciones consideradas en el modelo, ya sea un movimiento de traslación en el terreno (T) en un componente dado, o dos movimientos, uno de traslación de la base (S) y un movimiento de cabeceo (SC) de la base.

En el trabajo realizado por Toro Jaramillo (1997) se hicieron análisis con modelos que consideraron excitaciones en el sótano y en el terreno. Los modelos con excitaciones en el sótano fueron: 1N1GSC, 1N2GSC, 3N3GSC y 3N6GSC. Éstos se seleccionaron por ser los que estimaron mejor las frecuencias modales, con menores índices de error, presentaron

mejores ajustes en las respuestas de traslación y de torsión y requirieron menos tiempo de procesamiento para las mismas propiedades dinámicas identificadas con relación a aquellos con excitación en el terreno. En el presente trabajo se conoció que los efectos ISE tuvieron importancia en los eventos ocurridos después de la segunda rehabilitación, razón por la cual se analizaron modelos con excitaciones en el terreno, planos y tridimensionales, para tener en cuenta la posibilidad de que se presentasen variaciones en las propiedades identificadas en relación con los modelos con excitaciones de traslación y cabeceo en el sótano y fueron: 1N1GT, 1N2GT, 3N3GT y 3N6GT. En las figs 4.2 y 4.3 se presentan estos modelos.

Los modelos 1N1GT y 1N2GT se usaron para validar los resultados obtenidos con los modelos 1N1GSC y 1N2GSC respectivamente; y los modelos 3N3GT y 3N6GT para validar los resultados obtenidos con los modelos 3N3GSC y 3N6GSC respectivamente.

Los modelos que sólo consideran una respuesta de traslación o una respuesta de traslación y de torsión en la azotea: 1N1GSC, 1N2GSC, 1N1GT, 1N2GT resultan adecuados cuando la instrumentación con que se cuenta es limitada y además permiten hacer una estimación rápida de los parámetros la cual es útil para usarlos como entrada de los modelos de múltiples grados de libertad.

- **Modelo 1N1GSC:** tiene un grado de libertad asociado a la traslación en el componente L. Para la identificación utiliza los registros de traslación y cabeceo de sótano como excitaciones y el registro de traslación en L de la azotea como respuesta.
- **Modelo 1N2GSC:** tiene dos grados de libertad asociados a la traslación en T y a la torsión de la estructura. Para la identificación utiliza los registros de traslación en T y cabeceo del sótano como excitaciones y los registros de traslación en T y torsión de la azotea como respuestas.
- **Modelo 3N3GSC:** tiene tres grados de libertad asociados a las traslaciones en L de tres niveles de la estructura. Para la identificación utiliza los registros de traslación en L y cabeceo del sótano como excitaciones y los registros de traslación en L en tres niveles de la estructura como respuestas.

- **Modelo 3N6GSC:** tiene seis grados de libertad asociados a las traslaciones en T y torsiones de tres niveles de la estructura. Para la identificación utiliza los registros de traslación en T y cabeceo del sótano como excitaciones y los registros de traslación en T y torsión en tres niveles de la estructura como respuestas.
- **Modelo 1N1GT:** tiene un grado de libertad asociado a la traslación en el componente L de la estructura. Para la identificación utiliza el registro de traslación en L del terreno como excitación y el registro de traslación en L de la azotea como respuesta.
- **Modelo 1N2GT:** tiene dos grados de libertad asociados a la traslación en T y a la torsión de la estructura. Para la identificación utiliza el registro de traslación en T del terreno como excitación y los registros de traslación en T y torsión de la azotea como respuestas.
- **Modelo 3N3GT:** tiene tres grados de libertad asociados a las traslaciones en L de tres niveles de la estructura. Para la identificación utiliza los registros de traslación en L del terreno como excitación y los registros de traslación en L en tres niveles de la estructura como respuestas.
- **Modelo 3N6GT:** tiene seis grados de libertad asociados a las traslaciones en T y torsiones de tres niveles de la estructura. Para la identificación utiliza los registros de traslación en T del terreno como excitación y los registros de traslación en T y torsión en tres niveles de la estructura como respuestas.

Modelos para estimación de los efectos ISE

Para evaluar los parámetros asociados con los efectos ISE se evaluaron varios modelos con el fin de ver si era posible haciendo uso del programa MIMO determinar dichos parámetros. Hay que señalar que este programa no fue pensado para la estimación de los parámetros asociados con los efectos ISE, sin embargo, debido a la instrumentación con que se cuenta se propusieron modelos que permitieran identificar estos parámetros. Hay evidencias del uso del MIMO para identificar frecuencias de cabeceo de la base (Durrani *et al.*, 1994; Li y Mau, 1997).

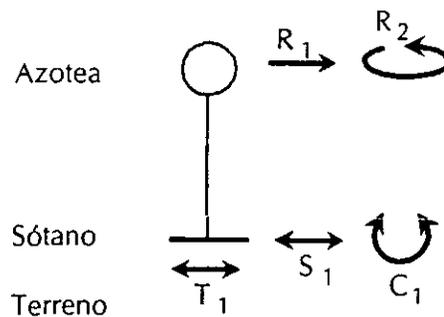
Las señales de excitación y de respuesta se seleccionaron con base en las señales que se relacionan en los cocientes espectrales de los análisis no paramétricos (numeral 4.1.3) según la frecuencia a ser identificada: traslación de la estructura y cabeceo de la base. No fue posible identificar frecuencias asociadas con la traslación de la base debido a la poca contribución de ésta a los efectos ISE del edificio en estudio (Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001).

Las respuestas y excitaciones consideradas en los diferentes modelos se refieren a dos tipos de movimiento: traslación y cabeceo en las dos direcciones ortogonales. Estos movimientos se definen con base en los registros tomados en puntos instrumentados de la azotea y el sótano del edificio de la siguiente manera:

- Los movimientos de traslación de la base y la estructura en los dos componentes ortogonales se definen con la señal de aceleración medida en el centro de la planta del sótano (SC) y azotea (AC), respectivamente, y según el componente de análisis. La respuesta para el modelo es la traslación relativa a la excitación que se considere.
- Los movimientos de cabeceo en la base se calculan como la diferencia de los registros verticales tomados en los extremos de la planta del sótano para cada componente dividida entre dos.
- Los movimientos de cabeceo en la azotea se calculan como la diferencia de los registros verticales tomados en los extremos de la planta del sótano para cada componente dividida por el brazo entre éstos según el componente de análisis y multiplicada por la altura del edificio.

La nomenclatura para nombrar los modelos es la misma usada para los modelos de identificación de las propiedades del sistema en las primeras cuatro posiciones. Las últimas posiciones indican las excitaciones consideradas en el modelo ya sea un movimiento de traslación en la base más uno de traslación debida al cabeceo en la azotea (ACE), un movimiento de traslación de la base más uno de traslación de la superestructura (ACC) o un movimiento de cabeceo de la base (SCC). Los modelos propuestos para identificar las frecuencias de traslación de la superestructura y cabeceo de la base (fig 4.4) son:

- **Modelo 1N1GACE:** tiene un grado de libertad asociado a la traslación en T o en L de la superestructura. Para la identificación utiliza la suma de los registros de traslación de la base y cabeceo en la azotea del componente respectivo como excitación y el registro de traslación en T o L según el componente de análisis, de la azotea como respuesta.
- **Modelo 1N1GACC:** tiene un grado de libertad asociado al cabeceo de la base. Para la identificación utiliza la suma de los registros de traslación de la base y traslación de la azotea en los componentes T o L como excitación y el registro de cabeceo en la azotea como respuesta según el componente de análisis.
- **Modelo 1N1GSCC:** tiene un grado de libertad asociado al cabeceo de la base. Para la identificación utiliza el promedio de los registros verticales en las esquinas opuestas del sótano para el mismo componente (T o L) como excitación y el registro de cabeceo en la base como respuesta según el componente.



Modelos	1N1GSC	1N2GSC	1N1GT	1N2GT
Respuestas Azotea	R_1	R_1, R_2	R_1	R_1, R_2
Excitaciones	S_1, C_1	S_1, C_1	T_1	T_1

Donde

R_1 es la respuesta de traslación, en el componente L o T, medida en la azotea

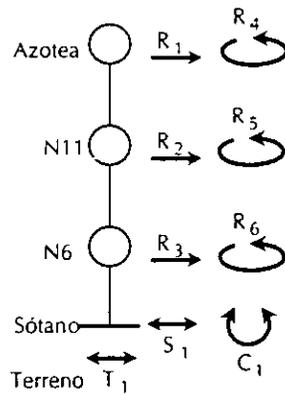
R_2 es la respuesta de torsión en la azotea

S_1 es la excitación de traslación, en L o en T, medida en el sótano

C_1 es la excitación de cabeceo en el sótano

T_1 es la excitación de traslación, en L o en T, en el terreno

Fig 4.2. Modelos de traslación, y traslación y torsión en la azotea



Modelos	3N3GSC	3N6GSC	3N3GT	3N6GT
Respuesta Azotea	R_1	R_1, R_4	R_1	R_1, R_4
Respuesta N11	R_2	R_2, R_5	R_2	R_2, R_5
Respuesta N6	R_3	R_3, R_6	R_3	R_3, R_6
Excitaciones	S_1, C_1	S_1, C_1	T_1	T_1

Donde

R_1, R_2 y R_3 son las respuestas de traslación, en el componente L o en T, medidas en la azotea, N11 y N6, respectivamente

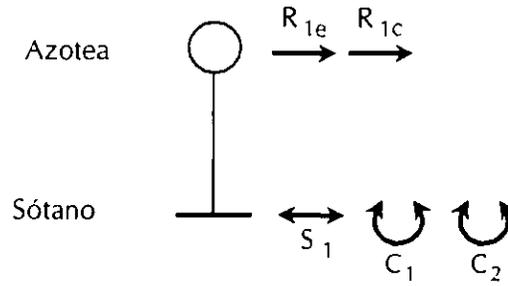
R_4, R_5 y R_6 son las respuestas de torsión en la azotea, N11 y N6 respectivamente

S_1 es la excitación de traslación, en L o en T, en el sótano

C_1 es la excitación de cabeceo en el sótano

T_1 es la excitación de traslación, en L o en T, en el terreno

Fig 4.3. Modelos de tres y seis grados de libertad



Modelos	1N1GACE	1N1GACC	1N1GSCC
Respuestas Azotea	R_{1e}	R_{1c}	C_1
Excitaciones	$S_1 + R_{1c}$	$S_1 + R_{1e}$	C_2

Donde

R_{1e} es la respuesta de traslación, en el componente L o en el componente T, medida en la azotea.

R_{1c} es la respuesta de cabeceo, en el componente L o T, medida en la azotea.

C_1 es la respuesta de cabeceo en el sótano.

S_1 es la excitación de traslación, en L o en T, medida en el sótano.

C_2 es la excitación de aceleración vertical medida en el sótano.

Fig 4.4. Modelos para propiedades ISE

5. EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN

Con el objetivo de estimar las principales propiedades dinámicas del edificio se hizo una evaluación de las técnicas de identificación no paramétricas y paramétricas descritas en el anterior capítulo. Para este análisis se seleccionaron dos eventos sísmicos ocurridos después de la segunda rehabilitación. El criterio de selección fue analizar la respuesta estructural ante un sismo de pequeña y otro de moderada intensidad.

Se hace un análisis de los registros completos y por tramos secuenciales en los componentes de traslación T y L con el fin de establecer la bondad de estas técnicas cuando se quiere conocer la variación de los parámetros identificados durante un evento. Se comparan los resultados obtenidos con las técnicas y se destacan los alcances y limitaciones del uso de éstas cuando se identifican las propiedades del sistema estructural.

5.1. Estimación no paramétrica

5.1.1. Análisis espectral global (FTexp)

Para la identificación de las frecuencias en los componentes T y L de los dos eventos sísmicos, se procedió primero con la selección de las frecuencias asociadas a ordenadas máximas del cociente espectral entre la azotea centro (AC) y el terreno (S), las cuales corresponden a las frecuencias naturales de vibrar del sistema en dichos componentes. Para validar las frecuencias identificadas, con los cocientes espectrales AC/N11 y AC/N6 se revisaron las relaciones de amplitudes, ángulos de fase y coherencias de estas frecuencias. Las frecuencias identificadas fueron aquellas que además de estar asociadas a las amplitudes máximas del cociente espectral AC/S, tuvieron altas coherencias. Para el primer modo, los movimientos de todos los niveles instrumentados se encuentran en fase (ángulos de fase nulos) con respecto a los de la azotea, y para el segundo modo, los movimientos de los niveles de la azotea y N6 están en fases opuestas (ángulos de fase de 180°). Algunas ordenadas de menor amplitud se deben a frecuencias de modos superiores de vibrar.

Los cocientes espectrales AC/S se calcularon para los dos eventos sísmicos con varios factores de suavizado (FS). Se usaron FS de 6, 12, 18 y 21, con el fin de eliminar cambios bruscos en

el espectro de una frecuencia a otra. Debido a que los FS modifican la amplitud del espectro, se compararon los parámetros identificados con cada uno de ellos. Las frecuencias que se obtuvieron con los diferentes FS fueron prácticamente las mismas. Sin embargo, los amortiguamientos calculados con el factor de amplificación dinámico resultaron ser sensibles a este factor. En estudios de identificación de propiedades dinámicas con vibración forzada (Murià Vila, et al, 1993) y en mesa vibradora (González Alcorta, et al, 1994), Se obtuvieron los amortiguamientos con cocientes espectrales entre los registros medidos en la azotea y la base para diferentes FS, estos valores se compararon con los estimados usando el método de decremento logarítmico; se encontró que si se empleaban FS iguales o mayores que 18 se obtenían valores cercanos a éstos últimos.

Con base en lo anterior, en este trabajo se tomó que para calcular aproximadamente el amortiguamiento del primer modo deben emplearse valores de FS iguales o mayores que 18 (fig 5.1). Los porcentajes de amortiguamientos críticos equivalentes del sistema suelo-estructura fueron de 1.1 a 5.3 por ciento para los modos fundamentales de vibrar. En la tabla 5.1 se presentan las frecuencias y porcentajes de amortiguamientos críticos estimados para los eventos 97-2 y 99-1 con FS de 6 y 18 en los componentes T y L. En algunos casos no se identifica claramente una frecuencia. Esto ocurre para el segundo modo en el componente T en el cual se identificaron variaciones de frecuencia entre 1.52 y 2.61 Hz. En estos casos se presenta un valor promedio.

Tabla 5.1. Frecuencias y amortiguamientos críticos estimados con el cociente espectral FTexp para FS de 6 y 18

Evento	Modo	FTexp							
		Frecuencias (Hz)				Amortiguamientos (%)			
		T		L		T		L	
		FS=6	FS=18	FS=6	FS=18	FS=6	FS=18	FS=6	FS=18
97-2	1	0.66	0.64	0.75	0.74	1.6	1.1	4.1	3.2
	2	2.56	2.53	2.83	2.94	11.1	9.6	15.8	11.8
	3	4.91	5.13	4.97	5.15	17.2	15.1	13.2	10.7
99-1	1	0.57	0.56	0.53	0.54	4.4	4.0	6.1	5.3
	2	1.97*	2.02*	2.78	2.67	13.7	10.5	15.0	9.5
	3	4.96*	4.88*	5.03*	5.03*	15.8	11.0	24.4	16.1

* Valor medio

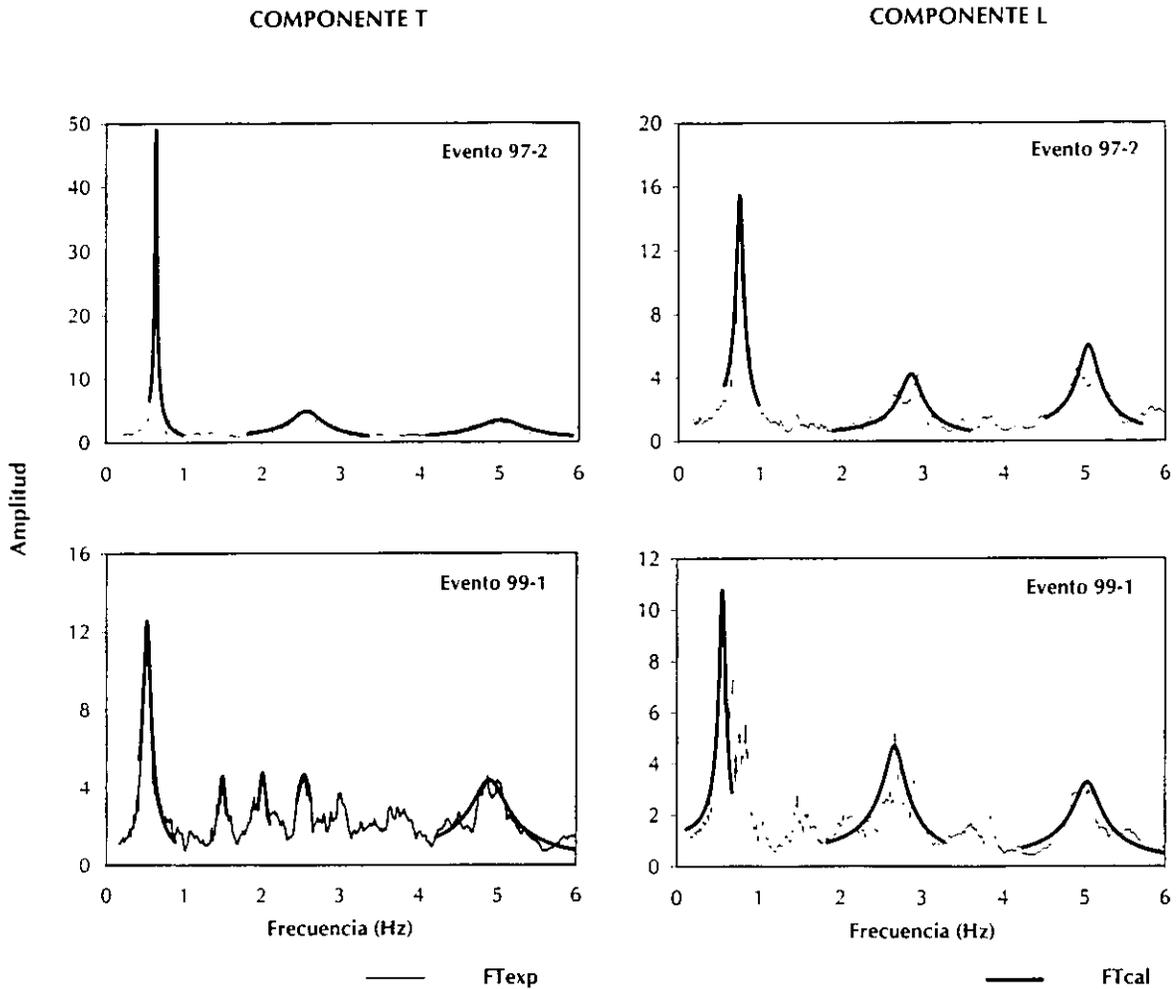


Fig 5.1. Ajuste al modelo de un grado de libertad para los eventos 97-2 y 99-1 con FS de 18

5.1.2. Análisis espectral secuencial (FTS)

Se calcularon los cocientes espectrales entre AC y S para los dos componentes ortogonales, dividiendo los registros en ventanas de 1024 y 2048 puntos para determinar la variación de las frecuencias naturales de vibrar del sistema. Se analizaron los cocientes espectrales para diferentes FS. En cuanto a éstos, se observó que con valores de 18 y mayores se dificultaba la estimación de frecuencias por la aparición de un gran número de ordenadas espurias. Al reducir FS a 6 se logró eliminar buena parte de las ordenadas asociadas a frecuencias espurias. Con este procedimiento no es válido el cálculo del amortiguamiento debido a que, como se vio anteriormente, los FS afectan las amplitudes del cociente espectral. Con relación a la frecuencia fundamental, ésta se ve bien definida. Sin embargo, no siempre es posible

identificar las frecuencias de modos superiores por falta de resolución en la señal para estos modos.

Se encontró que las ventanas de 1024 puntos eran adecuadas, ya que se llegó a valores similares en frecuencia que con las de 2048 puntos; además, se logró una mejor estimación de su variación. El efecto de la baja resolución en frecuencia al usar ventanas menores se corrigió aumentando el número de puntos con amplitud cero a cada tramo (Bendat y Piersol, 1989).

De los resultados obtenidos se puede ver que este método presenta dificultades en la identificación de la frecuencia fundamental, en varias ventanas en las que no se tiene una ordenada máxima bien definida. Estos problemas son más notorios en el evento más intenso (99-1). El cambio en la frecuencia del sistema se ve reflejado en la función de transferencia, dificultando la elección del valor máximo para el primer modo. En las figs 5.2 y 5.3 se muestran algunas ventanas analizadas de los eventos 97-2 y 99-1, respectivamente, para un FS igual a 6, en ellas se compara el cociente espectral de la ventana de análisis con el de la señal completa.

Para el evento 97-2 se muestran las ventanas de 40 a 50 s y 60 a 70 s de los componentes T y L en las que se puede notar una ordenada espectral bien definida correspondiente a la frecuencia del primer modo de vibrar (fig 5.2). En el evento 99-1 en la ventana de 80 a 90 s, correspondiente a la fase intensa de la señal, aparece una ordenada espectral bien definida en la función de transferencia, en la cual se puede identificar adecuadamente la frecuencia estructural. En la ventana de 120 a 130 s no se tiene una ordenada espectral bien definida. En ésta, la amplitud de la señal disminuye y coincide con una disminución fuerte en la frecuencia del sistema, dificultando la selección de la misma en esta ventana (fig 5.3).

Es una buena estrategia de selección en estos puntos críticos, observar la tendencia analizando la ventana anterior y posterior o hacer ventanas traslapadas que permitan detectar la variación de la frecuencia en estos tramos.

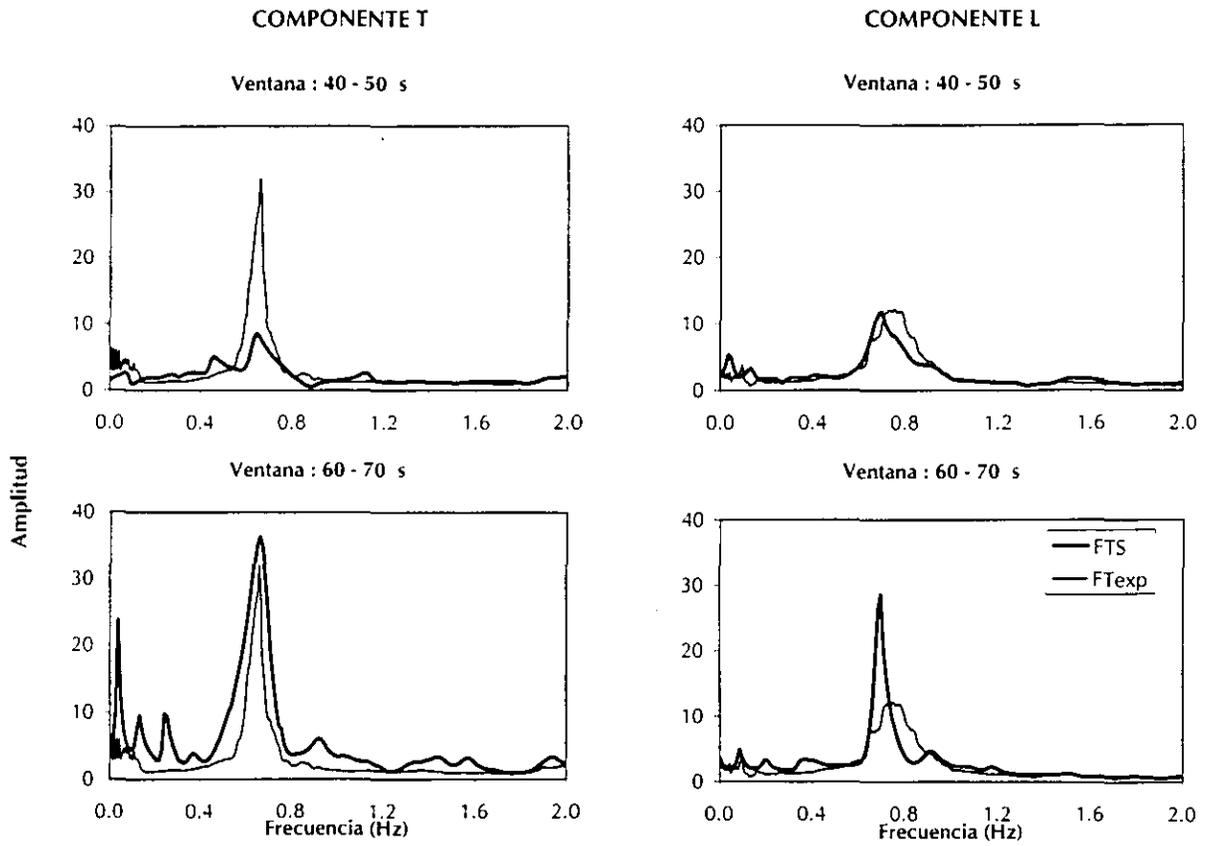


Fig 5.2. Cocientes espectrales FTS para el evento 97-2

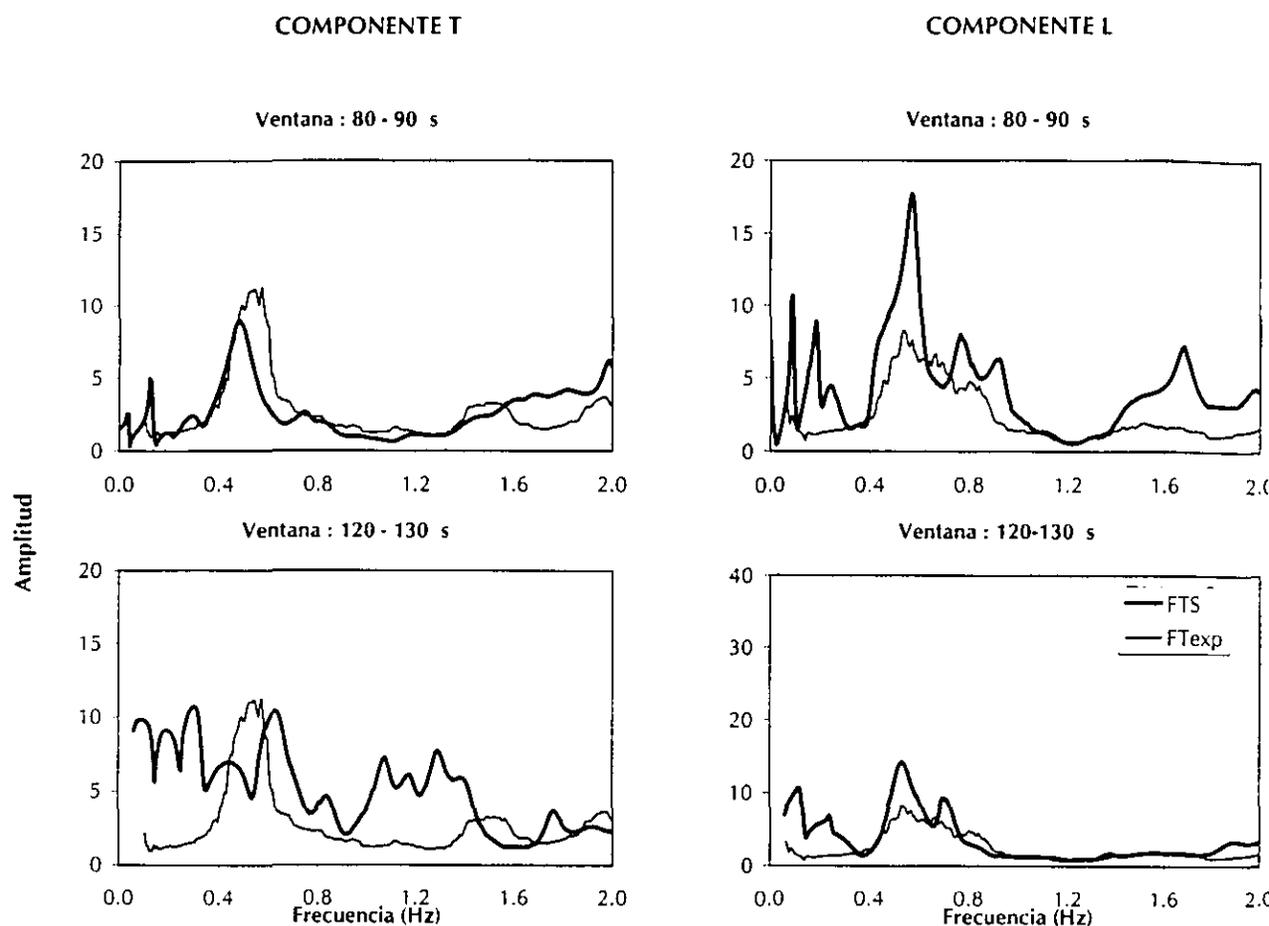


Fig 5.3. Cocientes espectrales FTS para el evento 99-1

5.2. Estimación paramétrica

5.2.1. Ajuste de un modelo lineal de un grado de libertad (FTcal)

Este procedimiento permite obtener una función de transferencia analítica, ajustando por mínimos cuadrados los parámetros de un modelo de un grado de libertad. La estimación se hizo con los cocientes espectrales de AC/S de los eventos 97-2 y 99-1 previamente calculados para los diferentes factores de suavizado y encontrando los parámetros que definen la curva de ajuste para cada una de las ordenadas máximas identificadas con el análisis espectral global. Este método de análisis permitió calcular las frecuencias fundamentales del sistema y el amortiguamiento del primer modo. Sin embargo, cuando se quisieron identificar modos superiores, se encontraron problemas, que dificultaron la selección de la ordenada máxima espectral para hacer el ajuste.

En el evento 97-2 se encontró una frecuencia fundamental de 0.76 Hz para el componente L y de 0.65 Hz para el componente T, y se observó que no había variación de éstas con FS. El amortiguamiento fue de 3.2 por ciento para el componente L y 1.0 por ciento para el componente T. En cuanto a los modos superiores, cuando se tiene un FS igual a 6 se pueden estimar las frecuencias, pero se sobrestima el amortiguamiento del sistema hasta en un 60 por ciento, con respecto a los valores correspondientes a FS de 18 (tabla 5.2).

Tabla 5.2. Frecuencias y amortiguamientos críticos estimados con el cociente espectral FTcal

Evento	Modo	Modelo FTcal							
		Frecuencias (Hz)				Amortiguamientos (%)			
		T		L		T		L	
		FS=6	FS=18	FS=6	FS=18	FS=6	FS=18	FS=6	FS=18
97-2	1	0.65	0.65	0.76	0.76	1.4	1.0	3.8	3.2
	2	2.61	2.59	2.84	2.86	11.0	10.2	17.9	11.8
	3	5.01	5.04	5.05	5.05	17.3	14.6	13.3	8.3
99-1	1	0.54	0.54	0.56	0.56	4.1	4.0	5.7	4.6
	2	1.97	2.02	2.65	2.67	13.8	10.5	14.5	10.7
	3	4.93	4.91	5.16	5.03	16.7	11.5	24.6	15.3

En el evento 99-1 se encontró una frecuencia fundamental de 0.56 Hz para el componente L y de 0.54 Hz para el componente T y nuevamente no hubo diferencias con FS. El amortiguamiento fue de 4.6 por ciento para el componente L y de 4.0 por ciento para el componente T. La identificación de modos superiores se hace compleja debido a que aparecen varias ordenadas espectrales asociadas a cambios en la frecuencia de los modos superiores a lo largo del evento (fig 5.1). Destaca el segundo modo, ya que se identificaron variaciones de frecuencia entre 1.50 y 2.61 Hz en la componente T con una frecuencia promedio de 2.02 Hz.

5.2.2. Estimación paramétrica modal (EP)

Con este procedimiento se identificaron las frecuencias y amortiguamientos del sistema en los dos componentes ortogonales. En el componente L se encontraron variaciones en las frecuencias del primer modo entre 0.73 y 0.82 Hz para el evento 97-2, y entre 0.53 y 0.87 Hz para el evento 99-1. En el componente T se observaron variaciones entre 0.66 y 0.73 Hz. En el segundo evento las variaciones fueron de 0.48 a 0.74 Hz (fig 5.4).

En los segundos modos las variaciones en el evento 97-2 fueron de 2.95 a 3.29 Hz en el componente L, y de 2.44 a 2.62 Hz en el componente T. En el evento 99-1 se tuvieron valores entre 2.17 y 3.29 Hz, y entre 1.59 y 2.68 Hz, en los componentes L y T, respectivamente (fig 5.4).

Los porcentajes de amortiguamiento crítico calculados variaron entre 3.0 y 9.0 por ciento en el componente L, y entre 0.5 y 7.0 por ciento en el componente T. En el evento 97-2 se tuvieron valores medios para el componente L de 4.7 y 4.2 por ciento, para los dos primeros modos, respectivamente; y en el componente T de 2.4 y 2.1 por ciento. En el evento 99-1 se tuvieron valores medios de 6.8 y 5.0 por ciento y de 4.2 y 3.7 por ciento para los dos primeros modos en los componentes L y T, respectivamente.

Se puede notar que los amortiguamientos estimados son menores en el componente L que en el T para los dos eventos, y a su vez son menores en el evento 97-2 que en el 99-1. Los mayores valores estuvieron asociados a mayor amplitud en el registro. Este parámetro se dificulta estimarlo con suficiente precisión ya que depende de la calidad de los registros, del método utilizado en la identificación y de otras variables en las que se tienen incertidumbres.

En la tabla 5.3 se comparan los valores de frecuencia encontrados para el primer modo en los eventos 97-2 y 99-1 analizados con las técnicas secuenciales en los componentes T y L. Se nota que hay una buena correlación de las respuestas encontradas con los dos métodos, siendo mejor en el componente L. Se aprecia (fig 5.4) que en los intervalos en los cuales la amplitud de la señal es mayor, las frecuencias identificadas con estos dos métodos son similares. Además, en aquellos intervalos donde la amplitud de la señal disminuye se encuentran las mayores variaciones en las frecuencias identificadas.

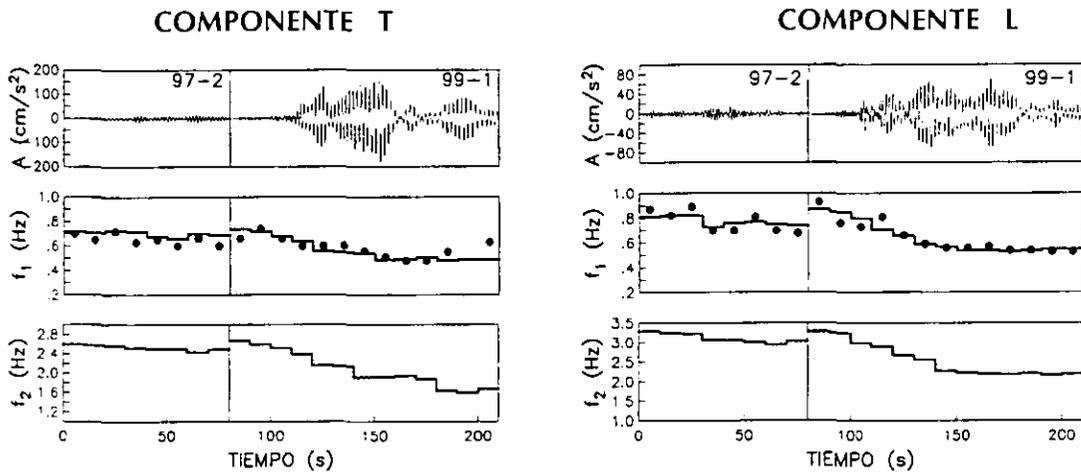


Fig 5.4. Frecuencias estimadas con los cocientes espectrales FTS y el análisis modal EP

Tabla 5.3. Comparaciones de las frecuencias estimadas con los cocientes FTS y el análisis modal EP

Evento	Ventana (s)	T			L		
		EP	FTS	FTS/EP	EP	FTS	FTS/EP
97-2	0-10	0.72	0.70	0.97	0.81	0.87	1.07
	10-20	0.71	0.65	0.91	0.82	0.82	1.00
	20-30	0.73	0.72	0.99	0.82	0.89	1.09
	30-40	0.72	0.63	0.88	0.73	0.70	0.95
	40-50	0.68	0.65	0.95	0.76	0.70	0.92
	50-60	0.66	0.60	0.91	0.77	0.81	1.05
	60-70	0.70	0.66	0.94	0.75	0.70	0.93
70-80	0.69	0.60	0.87	0.74	0.68	0.92	
99-1	0-10	0.66	0.66	1.00	0.87	0.93	1.07
	10-20	0.67	0.74	1.10	0.85	0.76	0.90
	20-30	0.64	0.66	1.03	0.80	0.73	0.91
	30-40	0.62	0.60	0.97	0.71	0.81	1.13
	40-50	0.57	0.60	1.05	0.66	0.66	1.00
	50-60	0.56	0.60	1.07	0.59	0.59	1.00
	60-70	0.54	0.56	1.03	0.57	0.56	0.97
	70-80	0.51	0.51	1.01	0.54	0.56	1.03
	80-90	0.50	0.48	0.96	0.54	0.57	1.05
	90-100	0.50	0.48	0.96	0.53	0.54	1.01
	100-110	0.50	0.55	1.10	0.54	0.54	0.99
	110-120	0.52	0.55	1.06	0.55	0.53	0.97
120-130	0.51	0.63	1.23	0.55	0.53	0.97	

En la tabla 5.4. se muestra la comparación entre las frecuencias encontradas para el primer modo con cada uno de los cuatro procedimientos descritos y analizados en este capítulo para los eventos 97-2 y 99-1.

Tabla 5.4. Comparación de las frecuencias del primer modo de vibración

Evento 97-2								
	T				L			
	FTexp	FTcal	FTS	EP	FTexp	FTcal	FTS	EP
Mínimo	0.64	-	0.60	0.66	0.68	-	0.68	0.73
Máximo	0.64	-	0.72	0.73	0.80	-	0.89	0.82
Promedio	0.64	0.64	0.65	0.70	0.74	0.76	0.77	0.78
Desviación estándar	-	-	0.04	0.02	-	-	0.09	0.04

Evento 99-1								
	T				L			
	FTexp	FTcal	FTS	EP	FTexp	FTcal	FTS	EP
Mínimo	0.46	-	0.48	0.48	0.47	-	0.53	0.53
Máximo	0.60	-	0.74	0.67	0.85	-	0.93	0.87
Promedio	0.56	0.54	0.59	0.54	0.54	0.56	0.64	0.64
Desviación estándar	-	-	0.07	0.05	-	-	0.13	0.13

Las frecuencias estimadas para el evento 97-2 son aproximadamente las mismas. En cambio, para el evento 99-1 hay mayores variaciones. Sin embargo, los intervalos de frecuencias estimadas con los cocientes espectrales (FTexp y FTS) y el análisis modal EP concuerdan aproximadamente.

En el análisis EP, se obtuvieron amortiguamientos (tabla 5.5) promedio un poco mayores que en los cocientes espectrales (FTexp y FTcal). Como se dijo anteriormente, éste es un parámetro que depende de muchas variables, entre ellas el método de cálculo. Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos por diferentes métodos se encuentran valores similares. Cabe mencionar que los amortiguamientos encontrados en el análisis paramétrico modal son más confiables ya que consideran las variaciones durante el evento cuando existen efectos no lineales.

Tabla 5.5. Comparación de los amortiguamientos del primer modo de vibración (%)

Evento	T			L		
	FTexp	FTcal	EP	FTexp	FTcal	EP
97-2	1.1	1.1	2.3 ± 0.7	3.2	3.2	4.7 ± 0.7
99-1	4.0	4.0	4.2 ± 1.5	5.3	4.7	6.8 ± 1.9

Comentarios

Se observa que en el uso de cualquier técnica de identificación de propiedades dinámicas deben tenerse en cuenta sus limitaciones, ya que si no se usan con cuidado se pueden cometer errores importantes en la estimación de dichas propiedades.

Las técnicas basadas en cocientes espectrales permiten determinar las frecuencias de un sistema, siempre y cuando se procesen con una adecuada resolución en frecuencia. En cambio, hay dificultades para el cálculo de los amortiguamientos modales, ya que éstos parámetros son muy sensibles a la calidad de las señales registradas, tanto en frecuencia como en amplitud, así como al factor de suavizado que se emplee en el análisis.

Con el ajuste de modelos de un grado de libertad se obtienen iguales o mejores resultados que con los cocientes experimentales. Ahora bien, cuando los datos tienen pobre resolución, o hay cambios durante el evento esta opción no es adecuada. En estos casos se recomienda el análisis paramétrico modal.

6. ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL SISTEMA

De la evaluación de las técnicas de identificación presentada en el capítulo cinco se seleccionaron las más apropiadas para identificar las propiedades del sistema y sus variaciones durante un mismo evento y de un evento a otro, utilizando los registros de los sismos ocurridos después de la segunda rehabilitación del edificio.

En este capítulo se determinan las principales propiedades dinámicas del edificio usando el análisis espectral para todos los eventos y la técnica paramétrica modal para los eventos: 97-1, 97-2, 98-1, 99-1, 99-2 y 99-3, los cuales se analizaron completos (no paramétrica) y por tramos secuenciales (paramétrica). El análisis paramétrico de los eventos previos a la rehabilitación aparece en el trabajo realizado por Toro Jaramillo (1997) y aquí se presentan algunos de sus resultados.

6.1. Análisis espectral (FTexp)

Para identificar las frecuencias del sistema se efectuaron los cocientes espectrales AC/S en los cuales se seleccionaron las ordenadas espectrales máximas correspondientes a las frecuencias de los tres primeros modos de vibrar. Para validar que las frecuencias identificadas fueran las del sistema se calcularon los cocientes espectrales $AC/N11$ y $AC/N6$, se revisaron las relaciones de amplitudes, ángulos de fase y coherencias entre las señales relacionadas.

Las frecuencias de torsión fueron aquellas asociadas a las ordenadas espectrales máximas del cociente espectral AO/AC . Se revisaron las relaciones de amplitudes, ángulos de fase y coherencias entre los puntos instrumentados de cada nivel y el punto AO con el fin de verificar que los ángulos de fase entre las esquinas instrumentadas de un mismo nivel fueran de 180° aproximadamente para confirmar que las frecuencias identificadas eran de torsión.

En la tabla 6.1 se muestran las frecuencias estimadas de traslación y torsión asociadas a los tres primeros modos de vibrar del sistema. En los casos en que no se identifica claramente una frecuencia, lo cual indica que hay una respuesta no lineal y/o una deficiente resolución en amplitud del movimiento asociado a dicha frecuencia, se identificaron intervalos de valores.

Los cocientes espectrales correspondientes a los valores de la tabla 6.1 se muestran en las figs 6.1 y 6.2, respectivamente para los eventos ocurridos antes y después de la segunda rehabilitación y en las figs 6.3 y 6.4 las funciones de coherencia para los mismos eventos, respectivamente.

En el evento 97-1 la rehabilitación estaba prácticamente concluida, las frecuencias tuvieron un incremento notable en el componente T y torsión respecto a eventos anteriores (tabla 6.1). Las frecuencias en el componente T se incrementaron de manera que resultaron ser similares a las del componente L. La frecuencia del primer modo en torsión tuvo un incremento tal que se alejó de la frecuencia fundamental de traslación en L.

Concluida la rehabilitación, se registraron dos eventos 97-2 y 98-1 en los cuales se encontraron frecuencias similares y un ligero incremento respecto al evento 97-1 debido tal vez a que en la última etapa de la rehabilitación se hicieron resanes y aplanados en algunos muros de mampostería, se colocaron varias ventanas y se construyó la escalera de emergencia. En el evento 99-1, se observa con respecto a los eventos anteriores un corrimiento de las amplitudes espectrales máximas hacia frecuencias menores (fig 6.2). En algunos casos no se identifican claramente las frecuencias, lo cual indica que hay una respuesta no lineal del sistema y/o una deficiente resolución en amplitud del movimiento asociado a dicha frecuencia. Ésto ocurre para el segundo modo en el componente T en la cual se identificaron variaciones de frecuencia entre 1.50 y 2.55 Hz. En el evento 99-2 se encontraron frecuencias similares al evento anterior, y en el 99-3 hubo una disminución de las frecuencias en los tres componentes.

Los porcentajes de amortiguamiento crítico variaron de 1.1 a 4.0 por ciento en el componente T y entre 2.6 y 5.2 por ciento en el componente L.

**Tabla 6.1. Frecuencias de vibración y amortiguamientos críticos del sistema
Para los eventos ocurridos antes y después de la segunda rehabilitación con el
análisis FTexp**

Evento	Fecha	Modo	Frecuencias (Hz)			h (%)	
			T	L	R	T	L
93-3	15/5/93	1	0.37	0.65	0.57-0.67	3.1	2.9
		2	1.34	2.58	2.16-2.28		
		3	2.47	4.81	3.50-3.80		
93-4	15/5/93	1	0.35	0.61	0.51-0.60	2.6	3.7
		2	1.29	2.66	1.89-1.97		
		3	2.25	4.72	3.30-3.48		
93-11	24/10/93	1	0.35	0.57	0.50-0.55	2.8	4.3
		2	1.26	2.47	1.86-1.92		
		3	2.20	4.67	3.02-3.20		
94-1	23/5/94	1	0.37	0.55	0.51-0.59	2.0	2.2
		2	1.31	2.22	1.94		
		3	2.30	4.52	3.28		
94-3	10/12/94	1	0.29-0.31	0.42-0.53	0.43-0.51	3.4	4.5
		2	1.22	1.57-2.32	1.87-2.45		
		3	2.12-2.19	3.29-4.65	3.25-3.39		
95-1	14/9/95	1	0.28	0.45	0.43	3.9	4.1
		2	1.16	1.94	1.77		
		3	1.67	3.82	3.31		
95-2	9/10/95	1	0.29	0.45	0.46	4.5	4.2
		2	1.14	1.88	1.66		
		3	1.85	3.69	2.64		
96-1*	15/7/96	1	0.32	0.48	0.47-0.48	4.2	3.2
		2	1.18	1.92	1.79-1.81		
		3	1.88	4.64	3.19-3.20		
97-1*	11/01/97	1	0.60-0.61	0.56-0.57	1.15	3.2	4.2
		2	2.20-2.60	2.30-2.70	3.50-3.80		
		3	5.07-5.33	4.70-5.37	5.20-6.50		
97-2	22/05/97	1	0.64	0.74	1.25-1.33	1.1	3.2
		2	2.52	2.94	4.19-4.22		
		3	4.70	4.90	—		
98-1	03/02/98	1	0.63	0.74	1.29-1.36	1.5	2.6
		2	2.51	2.94	4.17-4.29		
		3	4.73	4.73	—		
99-1	15/06/99	1	0.54-0.56	0.52-0.54	0.99	4.0	5.2
		2	1.50-2.55	2.13	3.24		
		3	4.85-5.04	4.84-5.09	—		
99-2	21/06/99	1	0.54-0.55	0.59-0.60	1.03	3.3	4.4
		2	1.93	2.16-2.51	2.94		
		3	4.86	4.72-5.36	—		
99-3	30/09/99	1	0.45-0.46	0.52	0.92-0.95	3.6	4.4
		2	1.37-2.30	1.84	2.68		
		3	4.52-5.04	5.05	—		

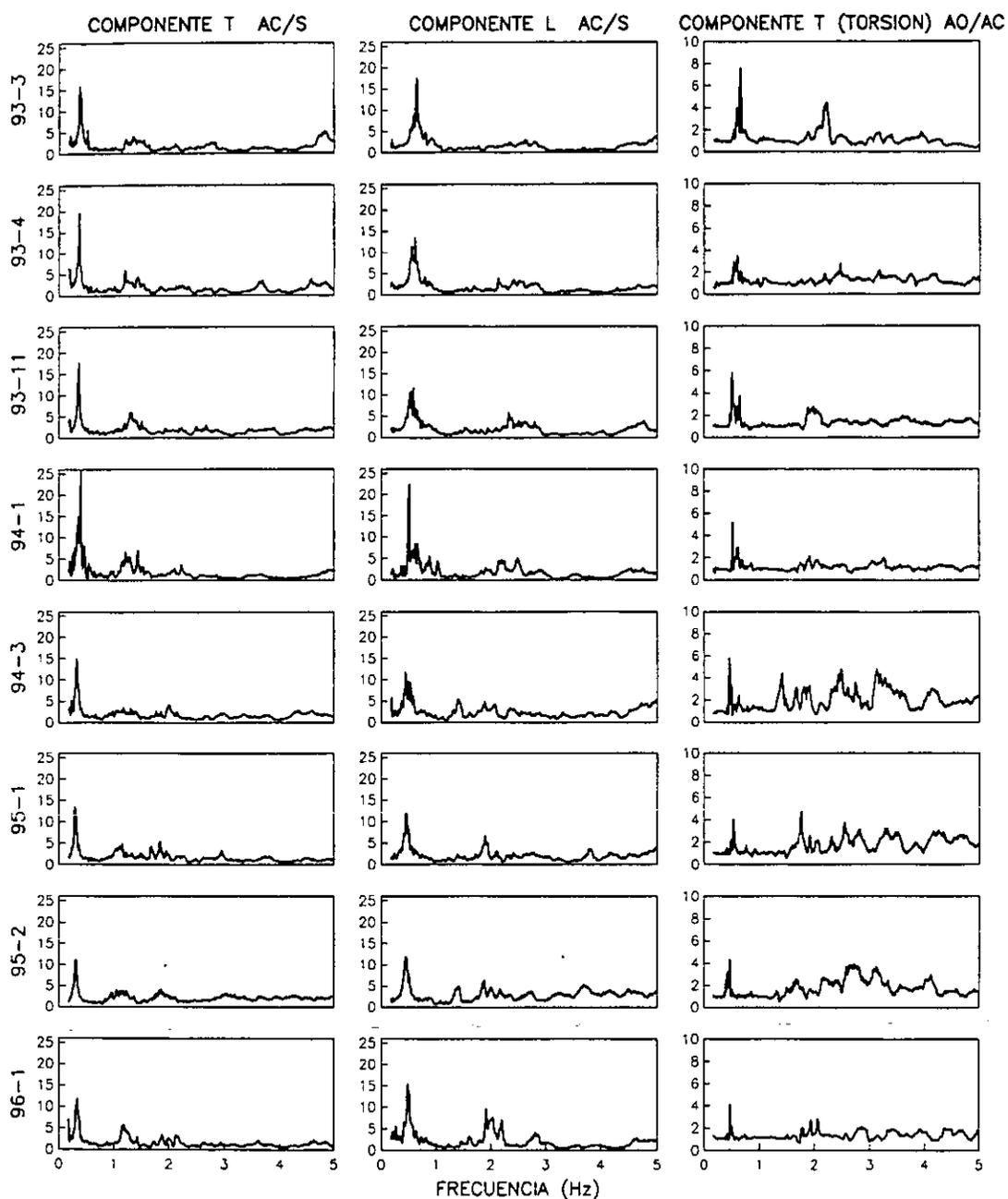
T - Componente trasversal

L - Componente longitudinal

R - Componente de torsión

h - Porcentaje de amortiguamiento crítico del primer modo

* Segunda rehabilitación en proceso constructivo



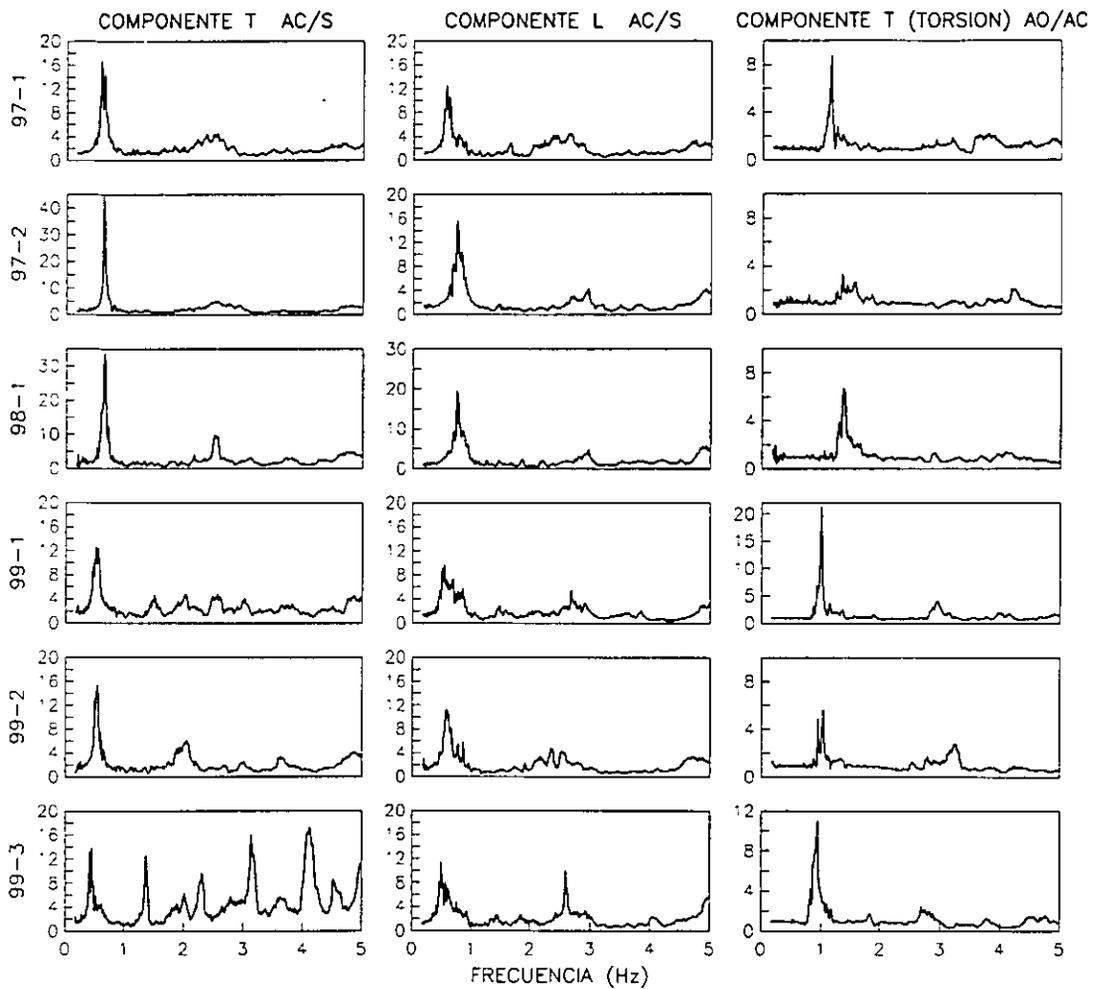


Fig 6.2. Cocientes espectrales AC/S, en los componentes T y L, y AO/AC en el componente T de los eventos ocurridos después de la segunda rehabilitación

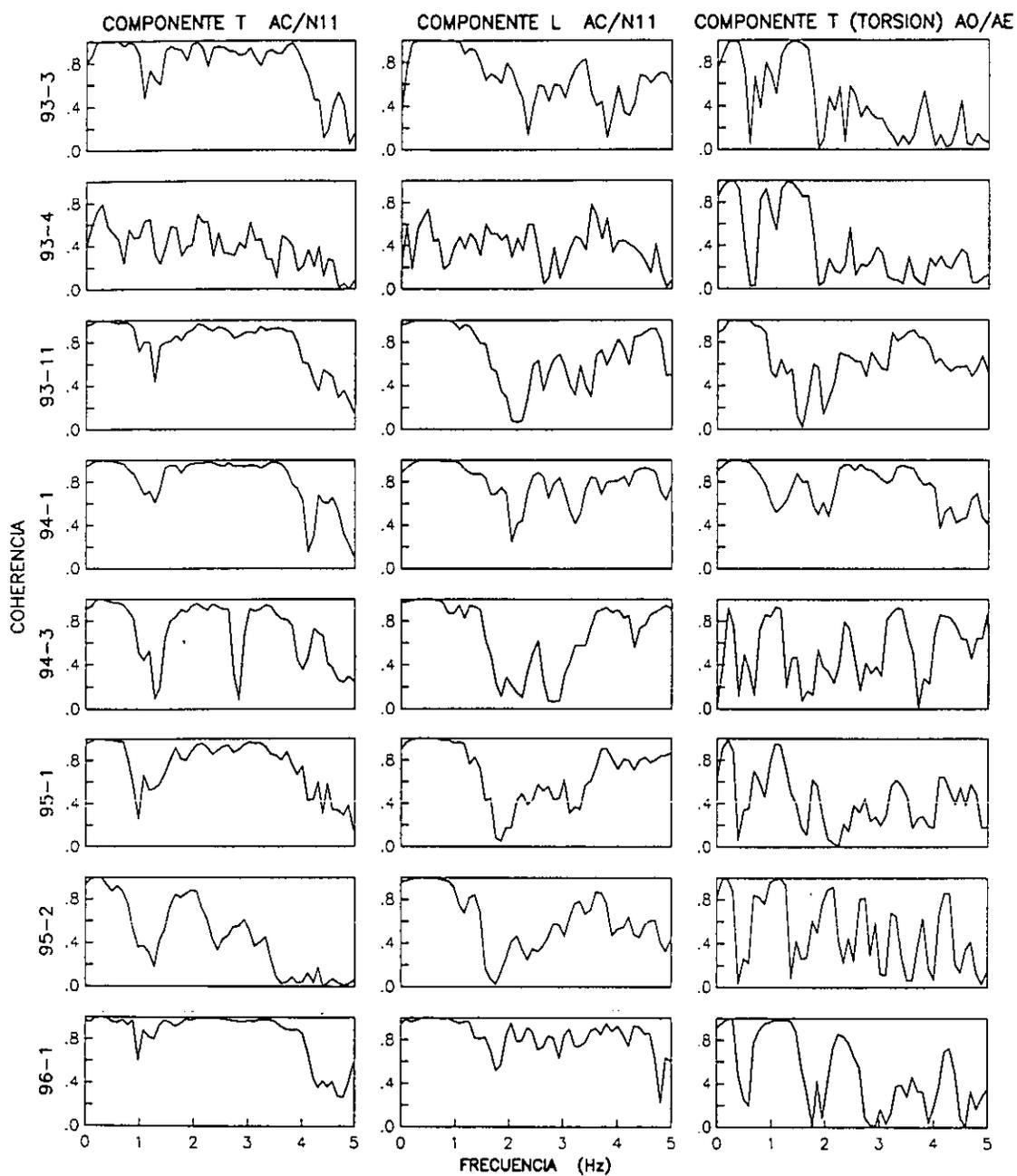


Fig 6.3. Funciones de coherencia correspondientes a los cocientes espectrales de la fig 6.1.

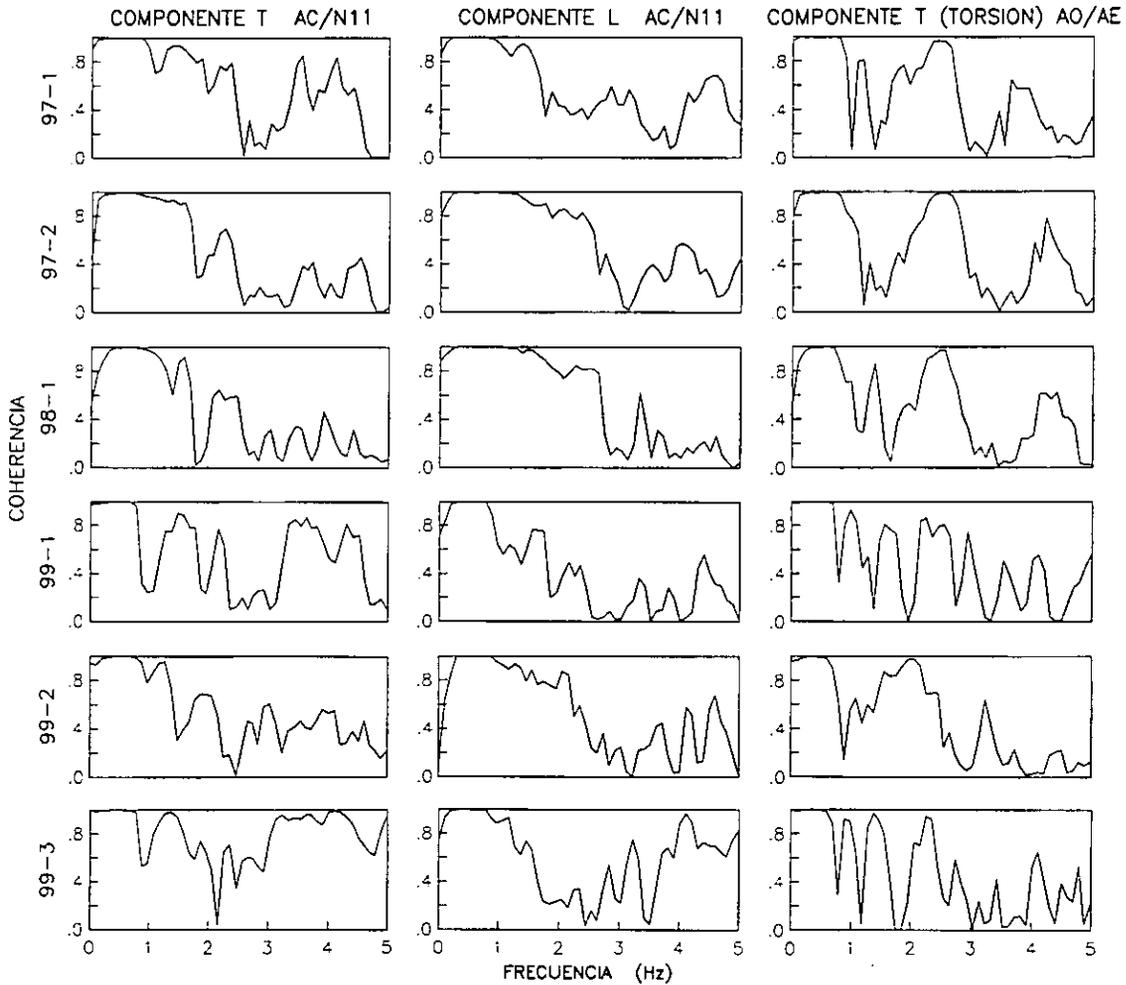


Fig 6.4. Funciones de coherencia correspondientes a los cocientes espectrales de la fig 6.2.

6.2. Estimación paramétrica modal (EP)

Debido a que varios de los registros estudiados revelaron cambios en las características del edificio durante un mismo evento, se vio la necesidad de analizar las señales por tramos en el dominio del tiempo y conocer la variación de los parámetros dinámicos. Con este procedimiento se identificaron las frecuencias, porcentajes de amortiguamientos críticos, formas modales, errores relativos de cada respuesta calculada con respecto a la experimental, errores totales del proceso de identificación y factores de participación de cada modo en la

respuesta. Se identificaron dos modos para cada componente, considerando que al identificar hasta el segundo modo se reprodujo bien la respuesta del edificio (Toro Jaramillo, 1997).

Los registros de los sismos se analizaron en ventanas de 10 s para detectar las variaciones de las propiedades dinámicas que pudieran ocurrir de una ventana a otra durante cada sismo. A los registros de los eventos 99-1 y 99-3 se les hizo un análisis adicional con ventanas de 5 s en el componente T para estimar variaciones importantes presentes en las primeras ventanas de estos eventos.

Con relación a los modelos usados para la identificación es importante aclarar que del trabajo realizado por Toro Jaramillo (1997), se concluyó que al usar modelos con excitaciones en el sótano se obtenían prácticamente las mismas frecuencias del sistema con menores índices de error que con los modelos de excitación en el terreno. Sin embargo, para los eventos ocurridos después de la segunda rehabilitación, los análisis no paramétricos preliminares mostraron un incremento en los efectos ISE en el edificio (Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001), con relación a eventos previos a la rehabilitación. Debido a este cambio de comportamiento, en este trabajo se hicieron análisis con modelos que incluyeran tanto las excitaciones en el sótano como en el terreno, con el fin de detectar las diferencias entre las frecuencias identificadas con estos dos planteamientos.

Se hizo un análisis preliminar con modelos que consideran los registros de traslación y torsión en la azotea (componente T), y sólo el registro de traslación en la azotea (componente L), que reducen el tiempo de convergencia y son adecuados incluso, para identificar segundos modos. El análisis del evento 99-1 mostró que en el componente L no hubo una variación en las frecuencias de los dos primeros modos y los amortiguamientos se mantuvieron del mismo orden al usar modelos con excitación en el terreno o en el sótano. En el componente T por el contrario, hubo cambios en las frecuencias identificadas al comienzo y durante la fase intensa del evento, éstas fueron menores en el primer modo para el modelo con excitación en el terreno y en el segundo modo se mantuvieron similares a las encontradas con el modelo de excitación en el sótano. Para la torsión las frecuencias encontradas con los dos modelos fueron similares.

De los resultados obtenidos para el evento 99-1 se decidió hacer análisis con los modelos 1N2GSC y 1N2GT para los demás eventos. En el evento 99-3 la frecuencia fundamental fue menor en el modelo 1N2GT que en el 1N2GSC para las ventanas correspondientes a la fase intensa de la señal, y se mantuvo similar para los dos modelos al final de evento. Las frecuencias de los segundos modos y de torsión y los amortiguamientos se mantuvieron similares. Los errores totales en la identificación de los modelos de terreno fueron ligeramente mayores a los de excitaciones en el sótano, con incrementos variables inferiores al 30 por ciento y los mayores se presentaron en los tramos de menor definición de las señales (baja amplitud) pero se tuvieron errores bajos aceptables en el proceso de identificación. De estos análisis se adoptaron los modelos con excitaciones en el terreno para la identificación de las propiedades dinámicas del sistema en todos los eventos ocurridos después de la segunda rehabilitación.

6.2.1. Estimación con los modelos 1N1GT (componente L) y 1N2GT (componentes T y torsión)

Las frecuencias identificadas con los modelos 1N1GT y 1N2GT para los dos primeros modos de vibrar en los componentes T, L y torsión se resumen en la tabla 6.2 y se presentan en la fig 6.5. Los amortiguamientos correspondientes a estas frecuencias se resumen en la tabla 6.3 y se muestran en la fig 6.6. Las tablas de los parámetros identificados se presentan en el apéndice A. En las figs 6.5 y 6.6 se comparan los parámetros estimados con los modelos 1N1GT y 1N2GT con los estimados de los modelos 3N3GT y 3N6GT respectivamente, estas comparaciones se comentarán en el numeral 6.3.1.

De la fig 6.5 se observaron ligeras variaciones en las frecuencias identificadas en el componente T y una respuesta más bien uniforme en L para los eventos 97-2 y 99-2. En el evento 98-1 de muy baja intensidad la respuesta fue prácticamente lineal.

En el evento 99-1 hay un ligero incremento en la frecuencia en L al inicio con relación al evento 98-1 y se presentaron variaciones. Se notó una disminución de las frecuencias encontradas en los tres componentes analizados, asociada a algunos daños presentes como los mencionados en el capítulo dos.

Durante el evento 99-3 hubo disminuciones en la frecuencia con relación a los dos eventos anteriores ocurridos en el año de 1999. Las frecuencias fundamentales de cada componente disminuyeron apreciablemente.

Los amortiguamientos mostraron cierta tendencia: se encontraron valores mayores para los primeros modos de vibrar y fueron más altos en el componente L que en T y torsión. Se tuvieron dificultades para la estimación de este parámetro en algunas ventanas, principalmente en el componente de torsión. Para facilitar la convergencia en estos casos se tomaron valores entre 1 y 3 por ciento y se comprobó que si se usaba un valor promedio de 2.5 por ciento las frecuencias identificadas no eran sensibles a este parámetro.

Tabla 6.2. Frecuencias de vibración estimadas con los modelos 1N2GT y 1N1GT para los eventos ocurridos después de la rehabilitación

Evento	Modo	Frecuencia (Hz)								
		T			L			Torsión		
		$f_{\min} - f_{\max}$	f_{promedio}	f_{de}	$f_{\min} - f_{\max}$	f_{promedio}	f_{de}	$f_{\min} - f_{\max}$	f_{promedio}	f_{de}
97-2	1	0.67-0.74	0.71	0.02	0.71-0.82	0.77	0.04	1.11-1.34	1.24	0.07
	2	2.46-2.69	2.55	0.08	2.95-3.28	3.10	0.12			
98-1	1	0.67-0.73	0.70	0.02	0.78-0.86	0.81	0.03	1.39-1.57	1.48	0.07
	2	2.44-2.58	2.51	0.05	2.93-3.25	3.03	0.12			
99-1	1	0.50-0.67	0.56	0.06	0.53-0.85	0.62	0.12	0.92-1.56	1.12	0.21
	2	1.43-2.62	2.07	0.34	1.43-3.53	2.21	0.78			
99-2	1	0.53-0.60	0.56	0.02	0.61-0.66	0.63	0.01	0.93-1.12	1.02	0.05
	2	1.93-2.21	2.06	0.07	2.37-2.66	2.51	0.07			
99-3	1	0.43-0.52	0.47	0.03	0.49-0.61	0.54	0.04	0.77-1.06	0.88	0.11
	2	1.41-2.06	1.73	0.20	2.02-2.59	2.28	0.20			

d e - desviación estándar

Tabla 6.3. Amortiguamientos críticos estimados con los modelos 1N2GT y 1N1GT para los eventos ocurridos después de la rehabilitación

Evento	Modo	Amortiguamiento (%)								
		T			L			Torsión		
		$\zeta_{\min} - \zeta_{\max}$	ζ_{promedio}	ζ_{de}	$\zeta_{\min} - \zeta_{\max}$	ζ_{promedio}	ζ_{de}	$\zeta_{\min} - \zeta_{\max}$	ζ_{promedio}	ζ_{de}
97-2	1	1.6-4.2	2.6	0.85	3.1-5.9	4.5	0.88	1.1-8.6	3.0	2.39
	2	0.6-3.0	1.8	0.90	2.6-6.9	4.0	1.37			
98-1	1	1.6-2.5	2.0	0.38	2.6-3.5	3.0	0.31	1.5-2.5	2.3	0.39
	2	0.9-2.5	1.7	0.66	1.1-2.1	1.6	0.43			
99-1	1	1.6-8.8	4.3	2.09	1.5-11.6	5.4	2.75	1.4-4.2	2.5	0.73
	2	0.2-12.8	5.2	3.95	1.4-5.9	3.6	1.42			
99-2	1	2.4-5.7	3.8	0.90	3.8-9.2	5.4	1.48	0.6-6.0	2.7	1.34
	2	0.9-3.2	2.2	0.78	2.0-7.1	3.8	1.48			
99-3	1	3.3-13.3	6.5	2.84	5.4-14.5	8.0	3.09	0.5-3.0	2.3	1.01
	2	1.1-3.8	2.1	0.95	0.4-14.0	4.8	4.43			

d e - desviación estándar

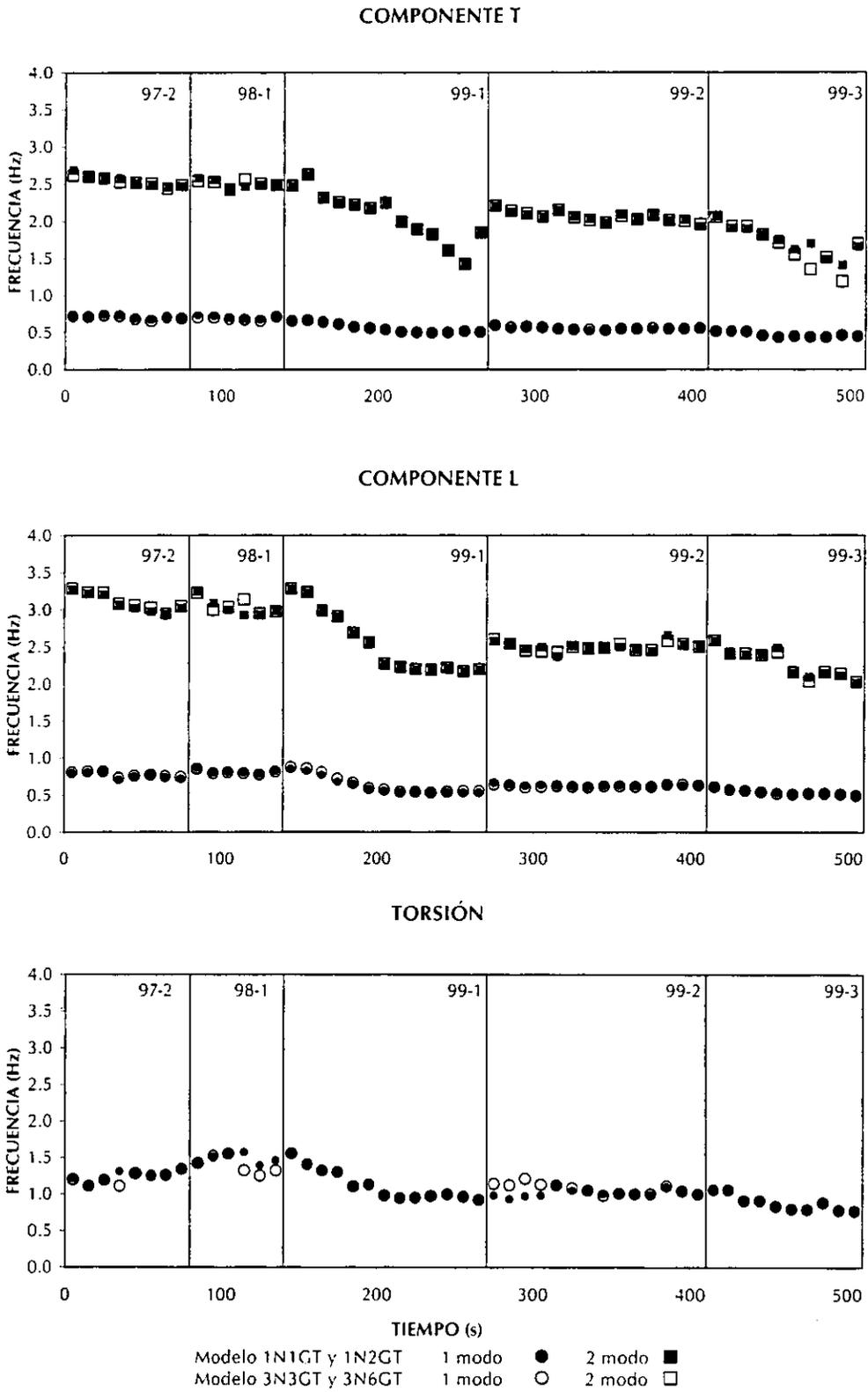


Fig 6.5. Frecuencias identificadas en los componentes T, L y torsión

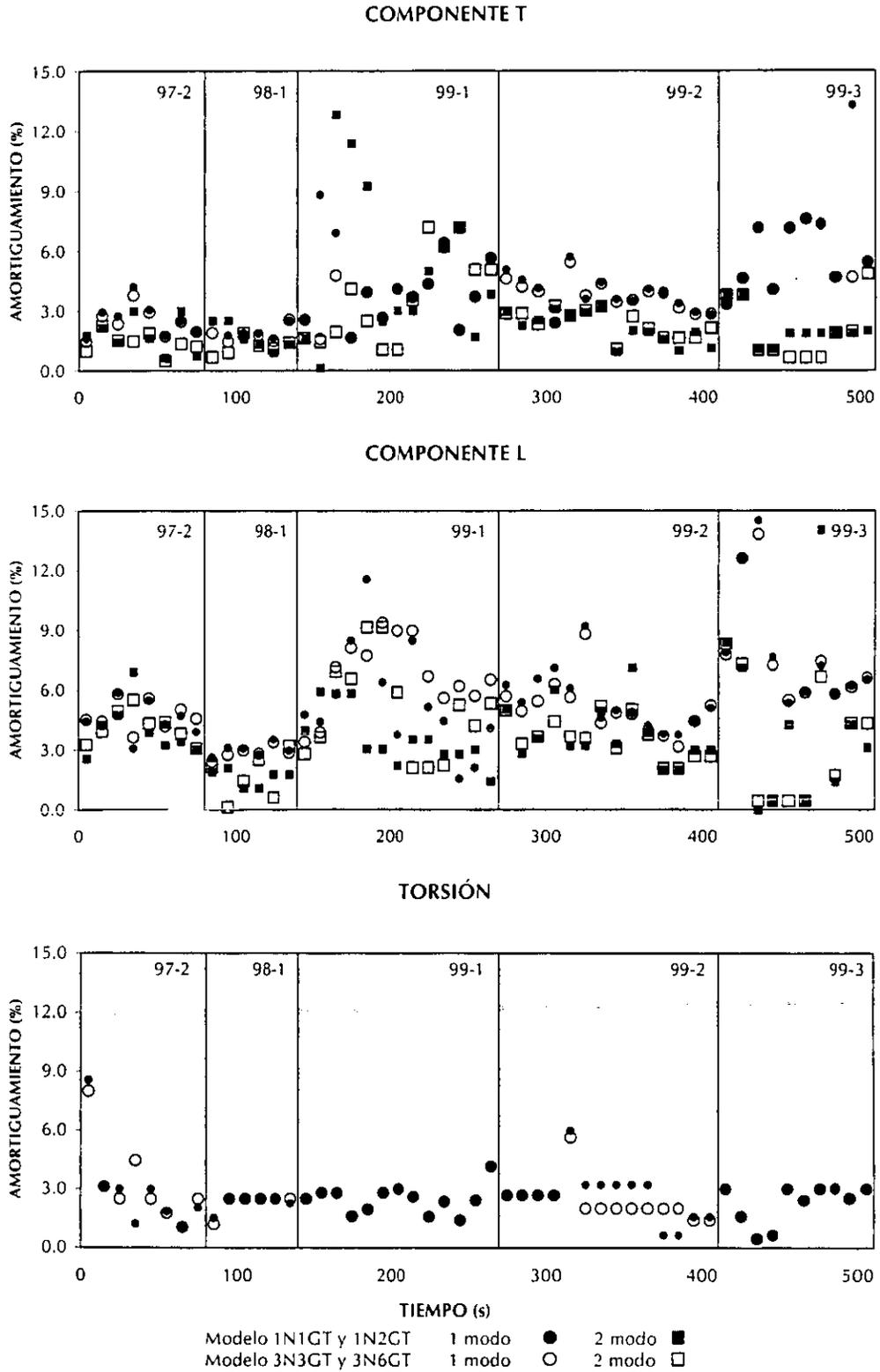


Fig 6.6. Amortiguamientos identificados en los componentes T, L y torsión

6.2.2. Estimación con los modelos 3N3GT (componente L) y 3N6GT (componentes T y torsión)

Los valores de frecuencias y amortiguamientos identificados con los modelos 3N3GT y 3N6GT se resumen en las tablas 6.4 y 6.5, respectivamente. En el apéndice A se presentan las tablas con todos los parámetros identificados para los seis eventos analizados. En las figs 6.7 a 6.9 se muestran las variaciones de las frecuencias y amortiguamientos correspondientes a los dos primeros modos de vibrar para cada componente junto con las señales de aceleración medidas en la azotea centro (AC). Se ilustran tanto las variaciones de los factores de participación en la azotea y en un nivel intermedio (N6) con sus respectivos porcentajes de error en la identificación, como el error total en la identificación.

Se observa que en algunos eventos las frecuencias permanecen invariables o varían levemente desde el comienzo al final del evento, indicativo de un comportamiento lineal o cuasi-lineal como es el caso de los eventos 97-1, 97-2, 98-1 y 99-2. En eventos como el 99-1 y el 99-3 se presentan mayores variaciones con una disminución en la frecuencia conforme avanza el evento indicando una respuesta no lineal y pérdida de rigidez asociados con daño estructural y no estructural en la edificación. Puede notarse que al comienzo de cada evento hay una leve recuperación en la frecuencia con relación al final del sismo anterior lo cual puede deberse al acomodo de los elementos después del sismo y resanes de las grietas.

Una vez concluida la segunda rehabilitación del edificio ocurre el evento 97-1 y los parámetros estimados muestran cambios importantes en las frecuencias con respecto al evento anterior (96-1), principalmente en el componente T (donde están las diagonales de acero) y en torsión. Se observó una recuperación importante de las frecuencias fundamentales respecto al evento 96-1 en los componentes T, L y torsión de 84, 16 y 120 por ciento, respectivamente (Toro Jaramillo, 1997). Se observa que la rehabilitación hizo que la frecuencia fundamental de la estructura en los tres componentes, se alejara de la frecuencia dominante del suelo.

Durante los eventos 97-2 y 98-1 se observa una respuesta cuasi-lineal con pequeñas variaciones en las frecuencias de los componentes horizontales. En el componente de torsión

se notan mayores variaciones en las frecuencias mostrando una ligera tendencia ascendente al comienzo y luego disminución al final del evento.

En el evento 99-1 se hizo evidente un comportamiento no lineal del sistema con una disminución en la frecuencia de traslación del primer modo cercana a la frecuencia dominante del suelo (0.5 Hz), haciendo que el sistema entrara en resonancia. En el componente L se encontraron variaciones en las frecuencias del primer modo entre 0.53 y 0.87 Hz y en el componente T de 0.48 a 0.67 Hz. En los segundos modos se manifestó la no-linealidad del sistema, con valores entre 2.17 y 3.29 Hz, y entre 1.43 y 2.62 Hz, en los componentes L y T, respectivamente.

En cuanto a la torsión se observa una disminución considerable en la frecuencia desde el comienzo y durante la fase intensa del sismo, después permanece constante con un ligero aumento al final del evento. La frecuencia más baja de torsión estuvo cerca de la frecuencia de traslación longitudinal (0.87 Hz).

Para el evento 99-2 se mantiene la frecuencia alcanzada al final del evento anterior. Éste es un sismo leve en el que el edificio permaneció en el intervalo lineal. La frecuencia fundamental de traslación en el componente L fue ligeramente superior a la frecuencia dominante del suelo y en T se mantuvo cerca de ésta. En torsión no se presentaron grandes variaciones.

El último evento importante, el más intenso, ocurrido en el edificio después de la segunda rehabilitación fue el evento 99-3. En éste se presentaron las máximas aceleraciones en la azotea en los dos componentes ortogonales de 304 cm/s^2 en T y de 116 cm/s^2 en L y la máxima en el terreno fue de 34 cm/s^2 . Los 40 s iniciales de este evento no se registraron adecuadamente por lo que no se cuenta con estos datos para el análisis. Sin embargo, se pudo captar la fase intensa y el final del sismo. Hay una disminución de las frecuencias durante la fase intensa y en el componente T la frecuencia del primer modo alcanza a igualarse e incluso a disminuir por debajo del valor de la frecuencia dominante del suelo; al final del evento logra recuperarse y se mantiene por debajo de los 0.5 Hz. En el primer modo del componente L también hay una disminución en la frecuencia manteniéndose similar a la frecuencia dominante del suelo con una ligera recuperación al final del evento. En los

segundos modos también son notorias las variaciones en frecuencia principalmente en el componente T con valores entre 1.19 y 2.05 Hz. En el componente L las variaciones son menores entre 2.03 y 2.59 Hz.

En los eventos más intensos como el 99-1 y 99-3 se hizo un análisis adicional con ventanas de 5 s con el fin de observar las variaciones de los parámetros principalmente durante las fases intensas. Los resultados encontrados fueron similares a los obtenidos con las ventanas de 10 s salvo algunas ventanas en las que se lograron identificar algunas variaciones en la frecuencia. Estos análisis detallados no siempre son necesarios, excepto en el caso de que se presenten fuertes cambios en la frecuencia entre una y otra ventana de análisis.

Los amortiguamientos identificados mostraron una tendencia a ser mayores en los primeros modos de vibrar y mayores en el componente L que en T y torsión. Los mayores valores estuvieron asociados a mayor amplitud en el registro y a una respuesta no lineal (eventos 99-1 y 99-3). En los eventos menos intensos se tuvieron amortiguamientos alrededor de 8 y 4 por ciento para los componentes L y T, respectivamente.

En las figs 6.5 y 6.6 se presentaron las frecuencias y amortiguamientos estimados con los modelos 1N1GT y 1N2GT comparados con los modelos 3N3GT y 3N6GT, para los componentes L, y T y torsión, respectivamente, de las cuales se tienen las siguientes observaciones:

- En todos los eventos se tienen prácticamente las mismas frecuencias del primer modo con los dos modelos para cada componente, excepto en algunas ventanas de los eventos menos intensos en el componente de torsión.
- Las frecuencias de los segundos modos se reproducen bien con los modelos 1N1GT y 1N2GT. En algunas ventanas hay ligeras dispersiones entre las frecuencias estimadas con relación a los modelos 3N3GT y 3N6GT, sin embargo aquellas no fueron significativas.
- En cuanto a los amortiguamientos se observa que mantienen la misma tendencia, con menor dispersión para los eventos menos intensos, en los que la variación de los

parámetros identificados es menor. Se observaron menores dispersiones en el componente T, donde se encuentran las diagonales, que en el componente L donde están los muros de mampostería.

Tabla 6.4. Frecuencias de vibración críticas estimadas con los modelos 3N6GT y 3N3GT para los eventos ocurridos después de la rehabilitación

Evento	Modo	Frecuencia (Hz)								
		T			L			Torsión		
		$f_{\min} - f_{\max}$	f_{promedio}	f_{de}	$f_{\min} - f_{\max}$	f_{promedio}	f_{de}	$f_{\min} - f_{\max}$	f_{promedio}	f_{de}
97-1	1	0.61-0.71	0.65	0.03	0.59-0.67	0.61	0.02	1.07-1.32	1.17	0.07
	2	2.39-2.57	2.44	0.07	2.33-2.73	2.44	0.11			
97-2	1	0.66-0.73	0.70	0.02	0.73-0.82	0.78	0.04	1.11-1.34	1.22	0.08
	2	2.44-2.62	2.54	0.06	2.95-3.29	3.12	0.12			
98-1	1	0.66-0.71	0.69	0.02	0.77-0.85	0.80	0.03	1.25-1.55	1.40	0.12
	2	2.43-2.56	2.51	0.05	2.95-3.23	3.06	0.11			
99-1	1	0.48-0.67	0.54	0.05	0.53-0.85	0.61	0.10	0.87-1.40	1.04	0.18
	2	1.43-2.62	1.96	0.31	2.17-3.29	2.44	0.33			
99-2	1	0.53-0.60	0.56	0.02	0.60-0.64	0.62	0.01	0.98-1.21	1.07	0.07
	2	1.96-2.21	2.06	0.07	2.43-2.60	2.50	0.05			
99-3	1	0.43-0.52	0.46	0.03	0.49-0.61	0.53	0.03	0.77-1.06	0.88	0.09
	2	1.19-2.05	1.57	0.26	2.03-2.59	2.20	0.19			

d e - desviación estándar

Tabla 6.5. Amortiguamientos críticos estimados con los modelos 3N6GT y 3N3GT para los eventos ocurridos después de la rehabilitación

Evento	Modo	Amortiguamiento (%)								
		T			L			Torsión		
		$\zeta_{\min} - \zeta_{\max}$	ζ_{promedio}	ζ_{de}	$\zeta_{\min} - \zeta_{\max}$	ζ_{promedio}	ζ_{de}	$\zeta_{\min} - \zeta_{\max}$	ζ_{promedio}	ζ_{de}
97-1	1	2.0-3.8	2.9	0.49	4.1-7.4	5.0	0.98	2.4-2.5	2.5	0.02
	2	1.3-3.2	2.2	0.57	1.4-7.6	3.6	1.68			
97-2	1	1.5-3.9	2.4	0.74	3.7-5.8	4.7	0.71	1.1-8.0	3.2	2.16
	2	0.5-2.2	1.4	0.53	3.1-5.5	4.2	0.82			
98-1	1	1.5-2.5	1.8	0.39	2.4-3.4	2.9	0.31	1.2-2.5	2.3	0.53
	2	0.7-1.9	1.2	0.41	0.1-3.2	1.7	1.17			
99-1	1	1.6-6.4	3.7	1.14	3.1-9.4	5.8	1.78	0.6-6.5	2.9	1.17
	2	1.1-7.2	3.5	1.72	2.1-9.1	4.5	2.13			
99-2	1	2.4-5.4	3.7	0.80	3.1-8.8	5.1	1.36	1.4-5.7	2.4	1.04
	2	1.1-3.2	2.4	0.68	2.1-5.2	3.6	1.04			
99-3	1	3.3-11.5	6.7	2.25	4.6-13.8	7.1	2.52	0.5-6.4	2.5	1.38
	2	0.7-4.9	2.3	1.34	0.4-8.4	3.7	2.85			

d e - desviación estándar

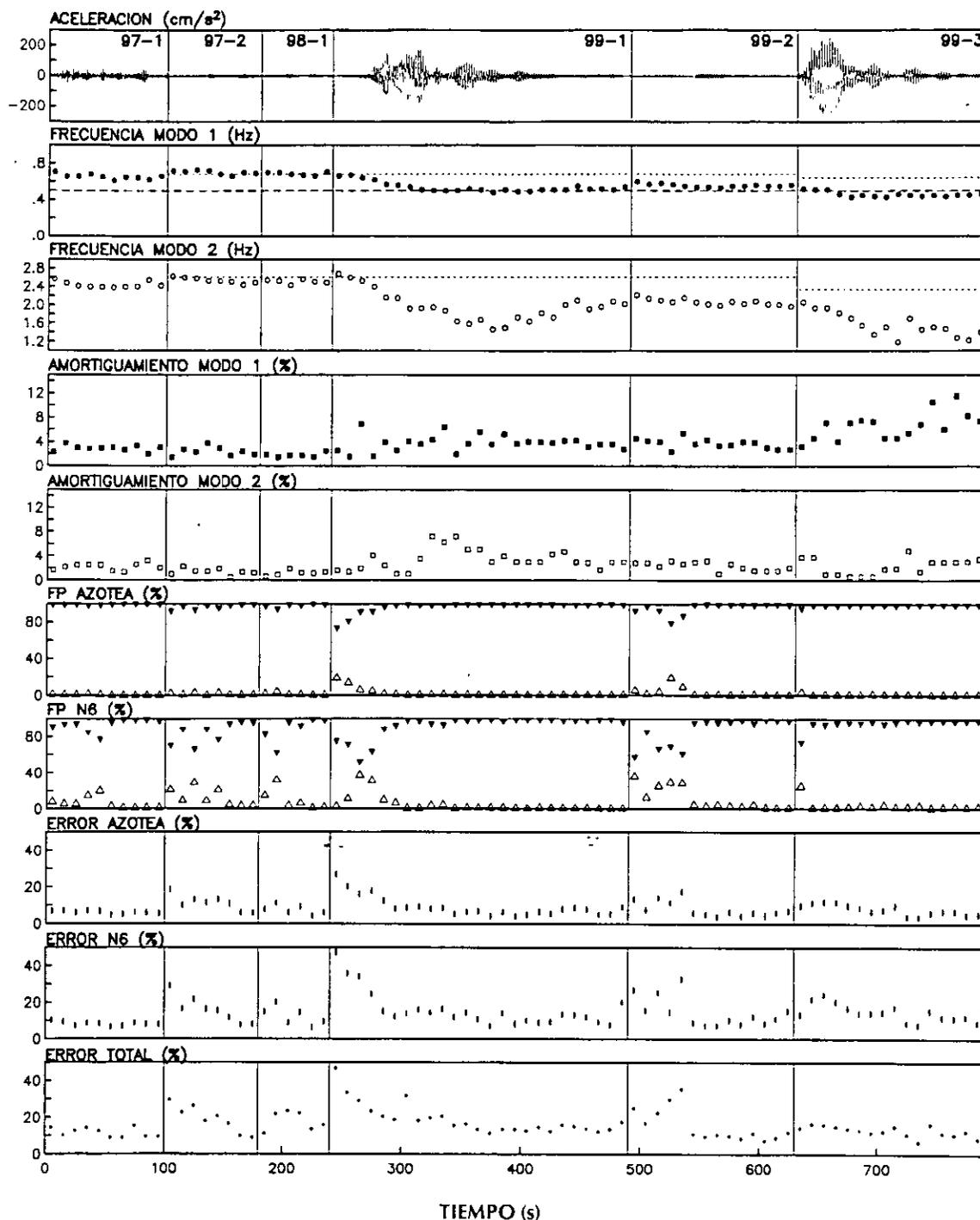


Fig 6.7. Parámetros estimados en el componente T con el modelo 3N6GT

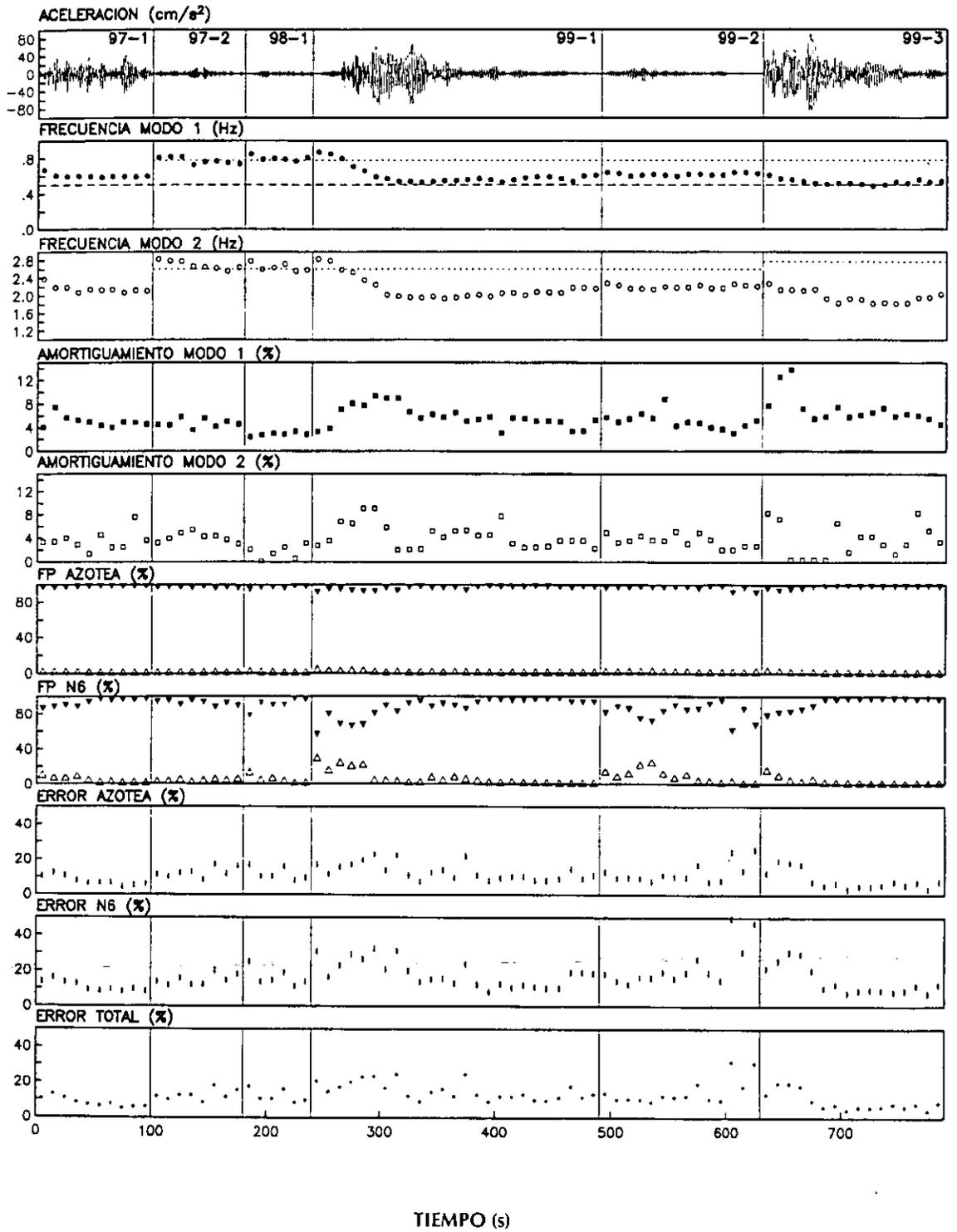


Fig 6.8. Parámetros estimados en el componente L con el modelo 3N3GT

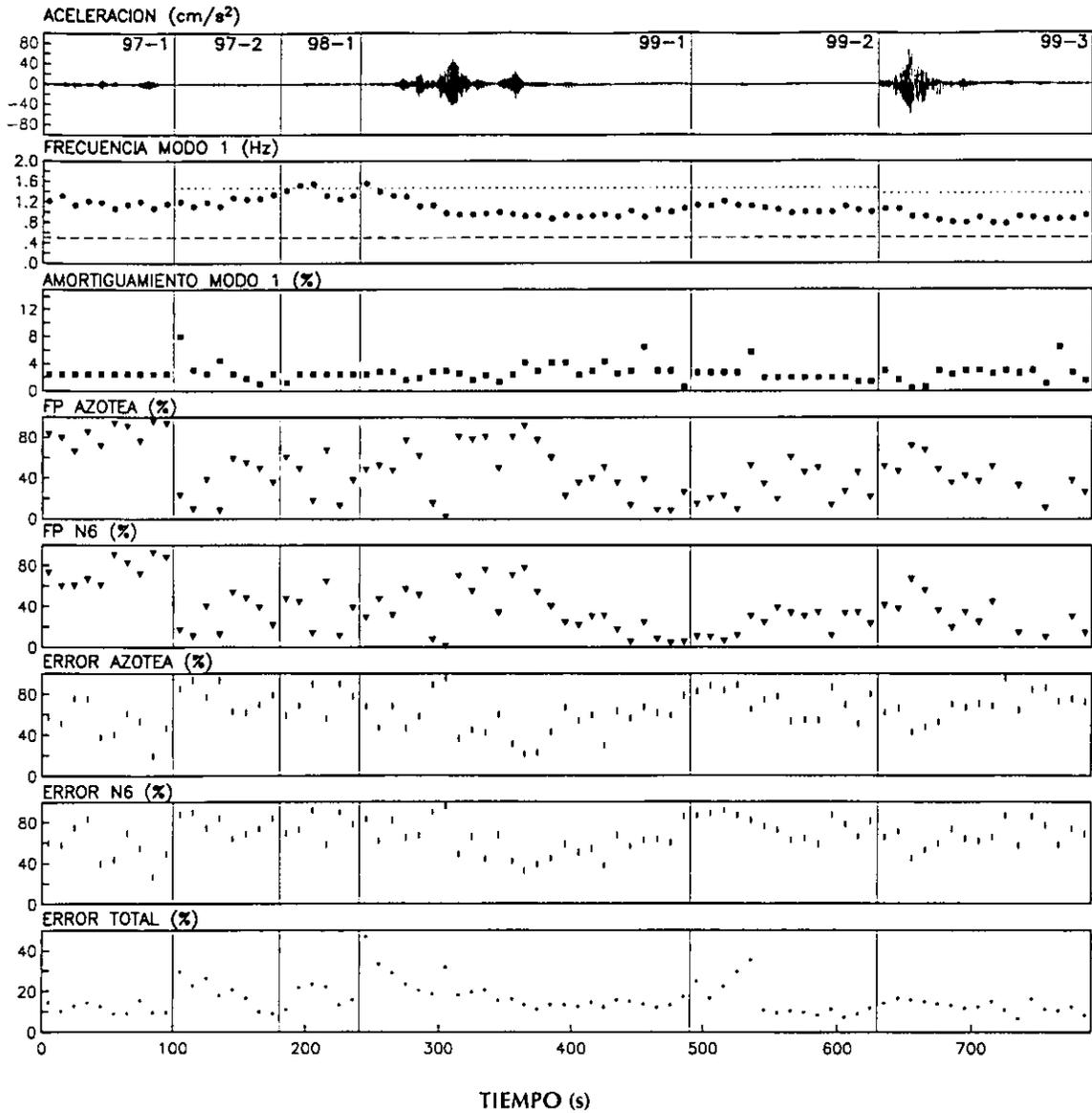


Fig 6.9. Parámetros estimados en torsión con el modelo 3N6GT

Comentarios

Se observó que en los eventos menos intensos, la variación de la frecuencia es poca y la tendencia del comportamiento uniforme. Se encontró un incremento con relación a eventos anteriores a la segunda rehabilitación demostrando un buen comportamiento de la estructura después de finalizada ésta, notándose un incremento en la rigidez del edificio.

Durante los eventos más intensos hubo una pérdida en la rigidez de la estructura, incluso llegándose a frecuencias cercanas a la frecuencia dominante del suelo que favorecieron una entrada en resonancia de la estructura y, por lo tanto, a que se presentasen grandes amplificaciones del movimiento en la azotea.

Los valores de amortiguamiento estimados presentaron algunas tendencias, fueron más altos en los eventos más intensos y en los tramos de mayor amplitud. Los amortiguamientos asociados al componente L estuvieron entre 0.5 y 14 por ciento y fueron mayores que en el componente T. Ésto se debe a que en la componente L del edificio, se tienen los muros de mampostería, y estos elementos al ser afectados por movimientos sísmicos influyen de manera importante en el amortiguamiento de ese componente aún en eventos de baja intensidad. En el componente T los amortiguamientos estuvieron entre 0.5 y 11 por ciento. En el componente de torsión la estimación del amortiguamiento se dificultó en algunas ventanas por problemas relacionados con la amplitud la señal, en estos casos se fijó a un valor de 2.5 por ciento para facilitar la convergencia del método comprobando que al fijar este valor no existieran cambios en las frecuencias y formas modales identificadas sin fijarlo.

Los modelos que sólo consideran las respuestas de traslación en dos direcciones ortogonales y torsión en la azotea reproducen muy bien la respuesta del edificio, incluso lográndose identificar modos superiores (segundo modo). Por lo tanto, ésto puede ser de gran utilidad para analizar la información aplicando esta técnica de identificación de sistemas en edificios donde se cuenta con poca instrumentación.

6.2.3. Factores de participación

Este parámetro indica la contribución total de cada modo en una respuesta identificada. Se observó que los dos primeros modos reproducen muy bien la respuesta con porcentajes mayores a 95 por ciento en todos los niveles en los componentes T y L, existiendo una participación importante del primer modo, con contribuciones superiores al 90 por ciento.

Se observan contribuciones mayores del primer modo en la azotea que en el nivel 6. Las participaciones menores están asociadas a las fases iniciales de los eventos; en la fase intensa la contribución principal es del primer modo y se mantiene hasta el final del evento.

Las participaciones asociadas al segundo modo fueron menores en el nivel de la azotea e inferiores a 19 y 4 por ciento en T y L, respectivamente. En el nivel 6 se tiene una contribución significativa del segundo modo inferior a 37 por ciento en el componente T y a 29 por ciento en el componente L. Las contribuciones mayores de segundos modos en el nivel 6 se dieron en los eventos menos intensos y en las fases iniciales de los eventos más intensos.

Las participaciones mayores en torsión (fig 6.9) se obtuvieron en el evento 97-1 con valores superiores al 65 por ciento. En los demás eventos, se tuvieron bajas contribuciones en torsión asociadas con una calidad deficiente de las señales y pequeñas amplitudes de las mismas para estas frecuencias, que se encuentran alejadas de la frecuencia dominante del sitio. En torsión, a diferencia de los componentes ortogonales T y L, las contribuciones en la azotea y nivel 11 fueron similares. Se tuvieron porcentajes de participación totales que variaron entre 10 y 95 por ciento con valores puntuales inferiores al 10 por ciento en algunas ventanas. La contribución promedio de la torsión en las respuestas estuvo alrededor de 58 y 55 por ciento en la azotea y nivel 6, respectivamente.

6.2.4. Índices de error

Éstos permiten validar los parámetros identificados, ya que representan la calidad del ajuste. Por lo tanto son útiles para determinar qué tan adecuado o no es un modelo de identificación de acuerdo a la información contenida en las señales experimentales.

Los índices de error relativos dependen de la diferencia entre las respuestas calculadas y experimentales, las que a su vez están relacionadas con las contribuciones de los modos estimados, así como también de la calidad y contenido de la señal y de las variaciones de los parámetros en una misma ventana. Pueden presentarse problemas de resolución en tramos donde las amplitudes son pequeñas o no están muy bien definidas, las cuáles son afectadas al realizarse la conversión analógica digital de la señal, existiendo la posibilidad de que se generen escalonamientos que no son bien reproducidos en el ajuste.

En las figs 6.7 a 6.9 se muestran los índices de error relativos en la azotea y nivel 11 y los errores totales para cada modelo en los componentes T, L y torsión, respectivamente. Los

errores totales en el modelo acoplado (3N6GT) involucran el componente T y el de torsión, razón por la cual el error total es el mismo en estos componentes. En el apéndice A se muestran los errores relativos para todos los niveles instrumentados en los dos componentes horizontales y de torsión y el error total en la identificación para todos los eventos analizados.

Los errores relativos de las respuestas calculadas en la azotea fueron menores que en los niveles inferiores debido principalmente a la mejor calidad de las señales y mayor amplitud del movimiento. Los índices de error en L fueron ligeramente menores a los de T y menores en las respuestas relacionadas con la traslación. Los errores totales encontrados variaron entre 4 y 32 por ciento para L y entre 7 y 47 por ciento en T y torsión.

Los mayores errores relativos se obtuvieron en las primeras ventanas, en las cuales se tienen amplitudes pequeñas de las señales y algunos componentes de alta frecuencia que no se logran reproducir. En el componente T los errores relativos variaron entre 4 y 27 por ciento; en torsión se tuvieron errores mayores que en los componentes ortogonales, asociados con problemas de amplitud de las señales y una baja contribución en la respuesta de este modo. Se tuvieron errores cercanos a 90 por ciento en algunas ventanas de baja amplitud, sin embargo se logró reproducir con buena aproximación la respuesta en torsión de la estructura (Apéndice B). Los errores más bajos en torsión estuvieron alrededor del 20 por ciento en los eventos 97-1 y 99-1. En el componente L los errores relativos estuvieron entre 3 y 26 por ciento en el nivel de la azotea, semejantes a los encontrados en el componente T.

Índices de error similares se han obtenido en edificios aplicando esta técnica de identificación (Li y Mau, 1991; Durrani et al, 1994) y se ha encontrado que los menores errores están asociados con un factor de contribución alto en la respuesta del primer modo y con una mayor amplitud en la señal como se vio en el presente trabajo.

6.2.5. Formas modales

Las configuraciones modales asociadas a las frecuencias identificadas con los modelos 3N3GT y 3N6GT se muestran en las figs 6.10 a 6.15. Se observa que tanto el primer modo como el segundo tienen una forma bien definida. Éstas están normalizadas con relación a la azotea para la cual tienen una amplitud unitaria. Se descartaron los valores de formas

modales de aquellas ventanas con errores totales superiores a 25 por ciento para los componentes T y L, y para la torsión, aquellas con errores relativos superiores a 70 por ciento.

Las formas modales de los primeros modos son prácticamente iguales durante cada evento. En los eventos 99-1, 99-2 y 99-3 se presentan leves variaciones. En los segundos modos se observa una cierta variación correspondiente a pequeñas amplitudes de los movimientos que, por insuficiente resolución en amplitud hace que las señales sufran distorsiones en el proceso de conversión analógico-digital. Las mayores variaciones en los segundos modos de L se dan en los eventos 98-1 y 99-2 que resultaron ser los de menores amplitudes.

En el componente T las mayores variaciones en las configuraciones del primero y segundo modos se presentaron en los eventos 99-1 y 99-3. Estas variaciones estuvieron asociadas a una significativa disminución en las frecuencias durante estos eventos.

De los tres componentes en el de torsión se presentaron las mayores variaciones en la configuración modal en todos los eventos las cuales fueron más notorias en los ocurridos en el año 1999. Estas variaciones correspondieron a disminuciones importantes en la frecuencia durante esos eventos.

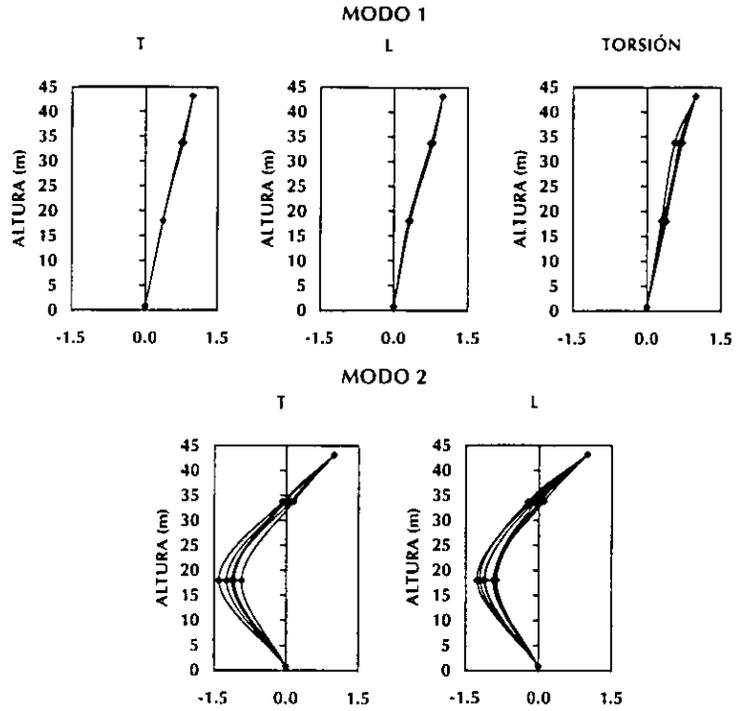


Fig 6.10. Formas modales para el evento 97-1 en los componentes T, L y torsión

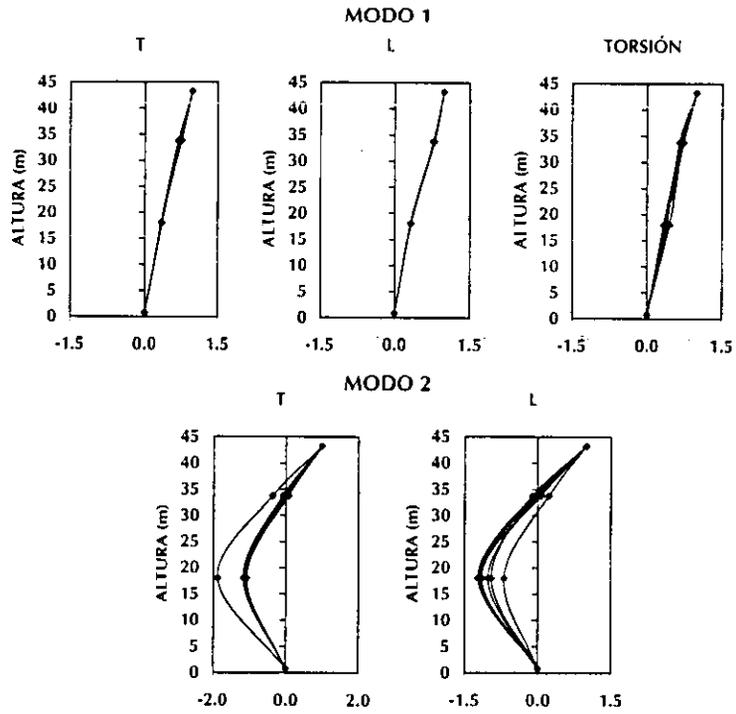


Fig 6.11. Formas modales para el evento 97-2 en los componentes T, L y torsión

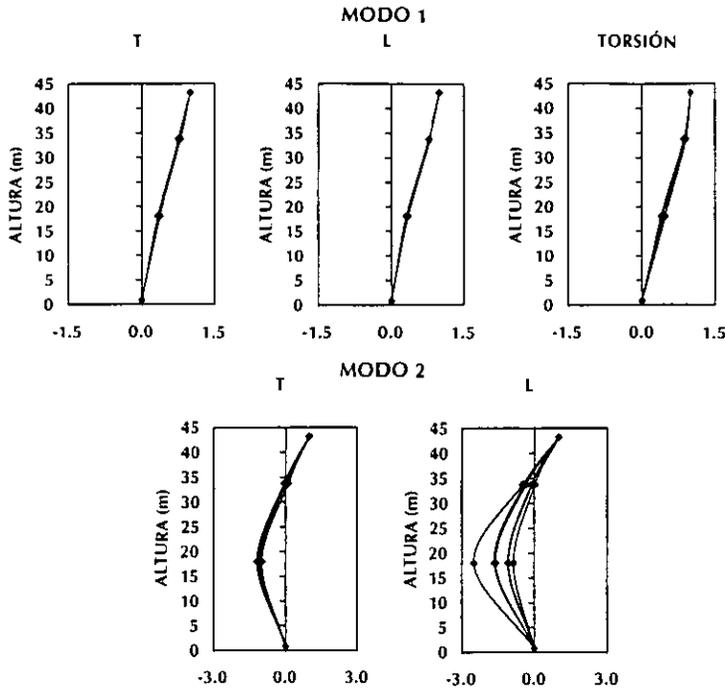


Fig 6.12. Formas modales para el evento 98-1 en los componentes T, L y torsión

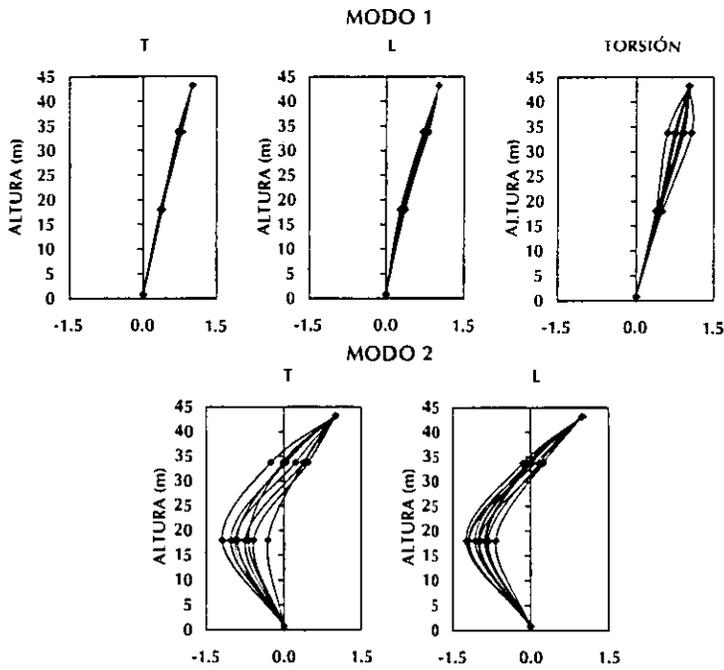


Fig 6.13. Formas modales para el evento 99-1 en los componentes T, L y torsión

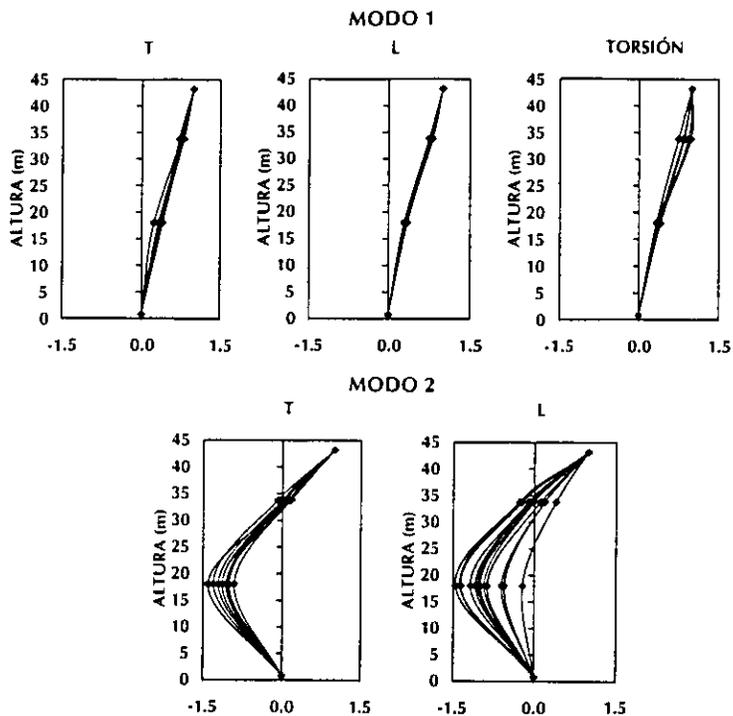


Fig 6.14. Formas modales para el evento 99-2 en los componentes T, L y torsión

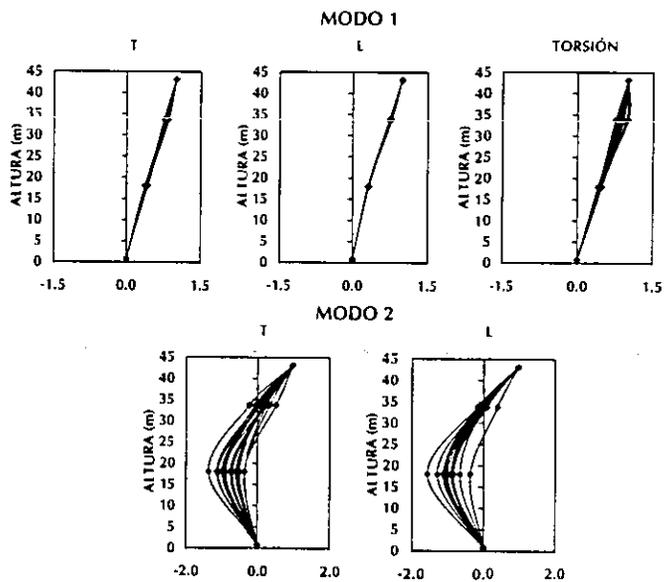


Fig 6.15. Formas modales para el evento 99-3 en los componentes T, L y torsión

6.3. Comparación entre las técnicas de identificación

En la tabla 6.3 se presenta un resumen de los parámetros identificados con el cociente espectral (FTexp) y con el análisis paramétrico (EP) para todos los eventos analizados. Las frecuencias que aparecen corresponden a la menor para cada evento y los amortiguamientos a un valor promedio para el modo fundamental.

Las frecuencias estimadas con FTexp resultaron similares a las obtenidas con EP. Se observa que hay una disminución en la frecuencia una vez concluida la segunda rehabilitación entre el evento 97-2 y 99-3 de 36, 33 y 30 por ciento para los componentes T, L y torsión, respectivamente.

Tabla 6.3. Frecuencias y amortiguamientos estimados con las técnicas no paramétrica (FTexp) y paramétrica (EP)

Evento	Modo	Frecuencias (Hz)						Amortiguamiento crítico (%)			
		T		L		Torsión		T		L	
		FTexp	EP	FTexp	EP	FTexp	EP	FTexp	EP	FTexp	EP
97-1	1	0.60	0.61	0.56	0.59	1.15	1.07	3.2	2.9	4.2	5.0
	2	2.20	2.39	2.30	2.33	3.50	-		2.2		3.6
97-2	1	0.64	0.66	0.74	0.73	1.25	1.11	1.1	2.4	3.2	4.7
	2	2.52	2.44	2.94	2.95	4.19	4.20		1.4		4.2
98-1	1	0.63	0.66	0.74	0.77	1.29	1.25	1.5	1.8	2.6	2.9
	2	2.51	2.43	2.94	2.95	4.17	3.69		1.2		1.7
99-1	1	0.54	0.48	0.52	0.53	0.99	0.87	4.0	4.1	5.2	5.8
	2	1.50	1.47	2.13	2.17	3.24	-		3.8		4.8
99-2	1	0.54	0.53	0.59	0.60	1.01	0.98	3.3	3.7	4.4	5.1
	2	1.93	1.96	2.16	2.43	2.94	-		2.4		3.6
99-3	1	0.45	0.43	0.52	0.49	0.92	0.77	3.6	7.2	4.4	7.1
	2	1.37	1.19	1.84	1.91	2.68	-		2.3		3.7

En el análisis EP se obtuvieron amortiguamientos promedio un poco mayores que en el cociente FTexp, principalmente en el componente L. Este es un parámetro de difícil estimación que depende de muchas variables, entre ellas el método de cálculo. Los amortiguamientos obtenidos con el análisis paramétrico modal son más confiables ya que consideran las variaciones durante el evento cuando existen efectos no lineales.

Los amortiguamientos mostraron una variación tal que resultaron mayores para los eventos más intensos. Se detectó que los del componente L variaron entre 1 y 14 por ciento y parece

que estas variaciones tienen que ver con una fuerte dependencia con la amplitud del movimiento, ya que, debido al deterioro de los muros de mampostería (componente L) y los elementos de concreto, los amortiguamientos resultan ser más altos mientras ocurre la formación de grietas o se activan los planos de falla de grietas generadas en sismos anteriores. Cuando la estructura se acomoda estas grietas vuelven a cerrarse. El amortiguamiento dependerá de la fricción existente entre las caras de la grieta, las irregularidades del plano de falla y las fluctuaciones en la amplitud del movimiento. En el componente T en el cual hay una menor densidad de muros de mampostería y están las diagonales de acero, se encontraron amortiguamientos menores.

7. ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA (ISE)

Se determinó la influencia de los efectos ISE en la respuesta dinámica del edificio Jal, debido a que se encuentra ubicado en la zona blanda de la ciudad de México. Se hizo un análisis de los registros de los eventos más significativos que ha sufrido el edificio desde su instrumentación. Éstos se analizaron completos y por tramos secuenciales con el fin de establecer una variación de los parámetros identificados durante un mismo evento y de un evento a otro. Se comparan los resultados obtenidos con las diferentes técnicas empleadas y se hace una discusión de la influencia de los efectos ISE, en la respuesta dinámica del edificio antes y después de la segunda rehabilitación.

7.1. Estimación no paramétrica

Con el fin de determinar aproximadamente la importancia de los efectos ISE, se efectuaron los cocientes espectrales SC/S , también conocidos como funciones de transferencia de piso, que permiten definir el movimiento efectivo en la base de la cimentación. En las figs 7.1 y 7.2 se presentan los espectros de Fourier de las señales medidas en el sótano centro (SC) y en el terreno (S), en los tres componentes de análisis. Se puede observar que el mayor contenido de energía está entre cero y dos Hz. En las figs 7.3 y 7.4 se presentan los cocientes espectrales SC/S para los eventos ocurridos antes y después de la segunda rehabilitación, respectivamente. En éstos, los valores de amplitud iguales a uno indican que en la cimentación el movimiento es igual al del terreno. Se observan reducciones del movimiento en alta frecuencia, y en frecuencias cercanas a la fundamental del edificio se ven algunas ordenadas máximas de amplificación, que es más notorio en el componente T y en aquellos eventos después de la segunda rehabilitación.

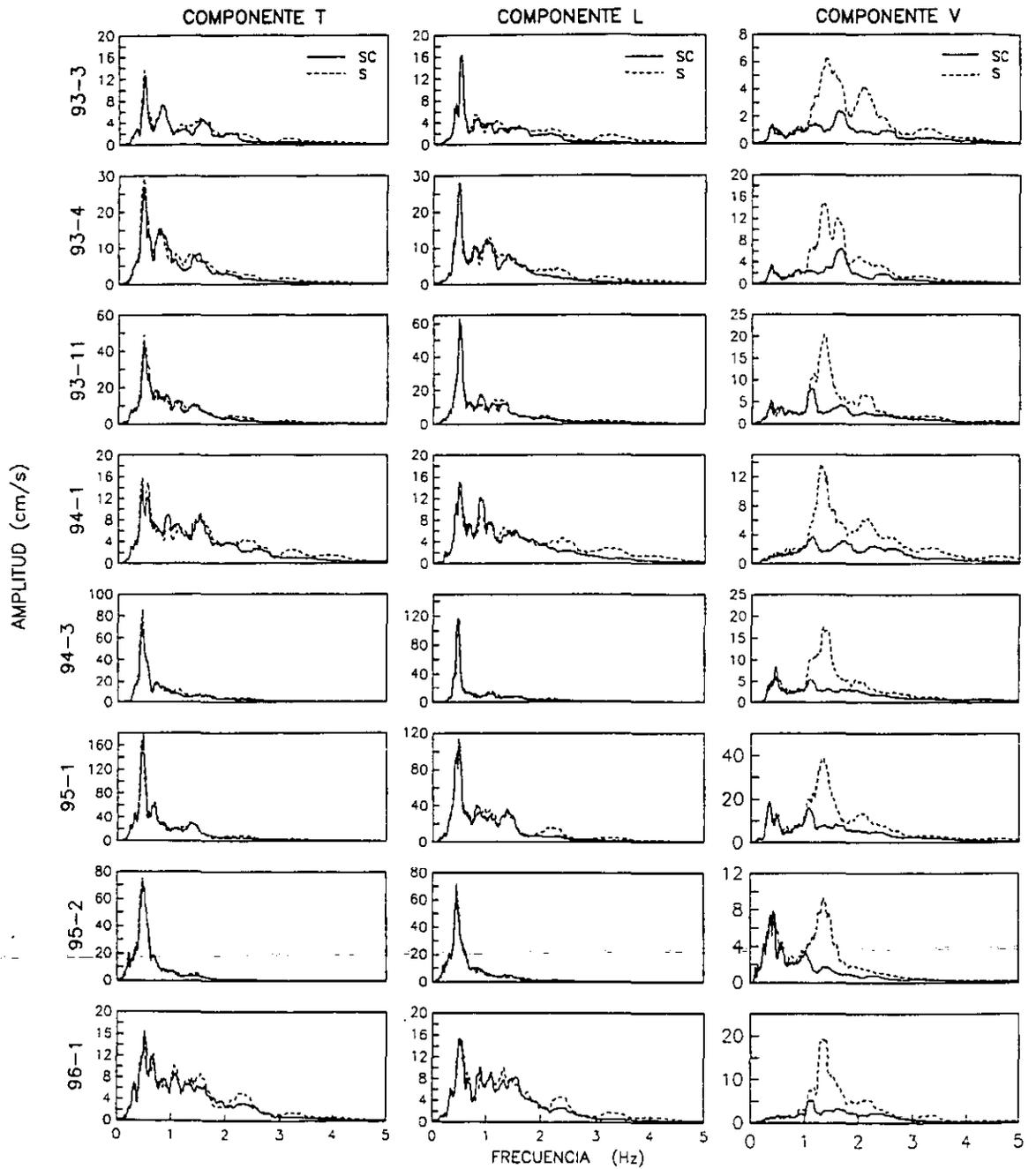


Fig 7.1. Espectros de amplitudes de Fourier de la estación del terreno (S) y el punto (SC) en los componentes T, L y V de los eventos antes de la segunda rehabilitación

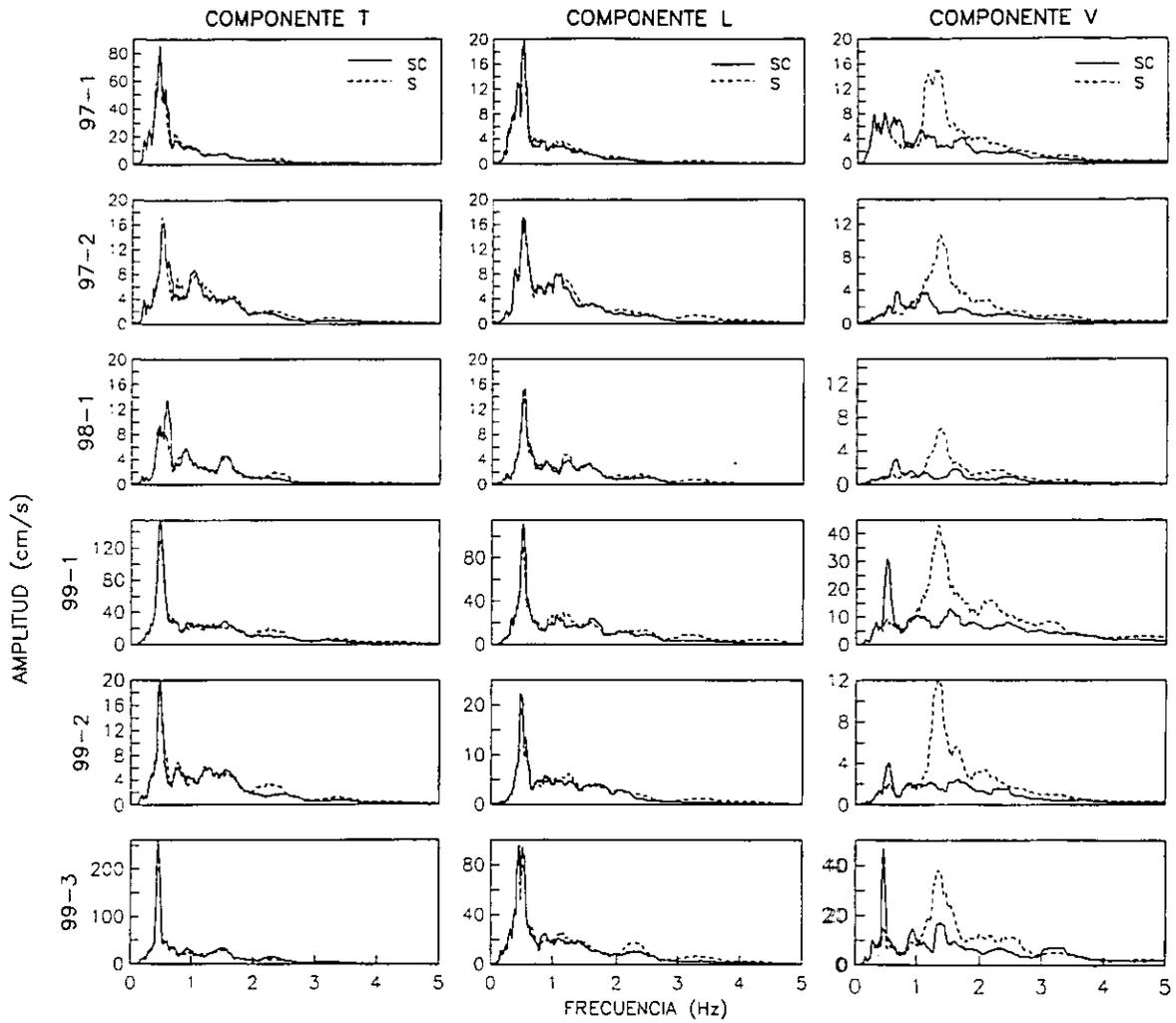
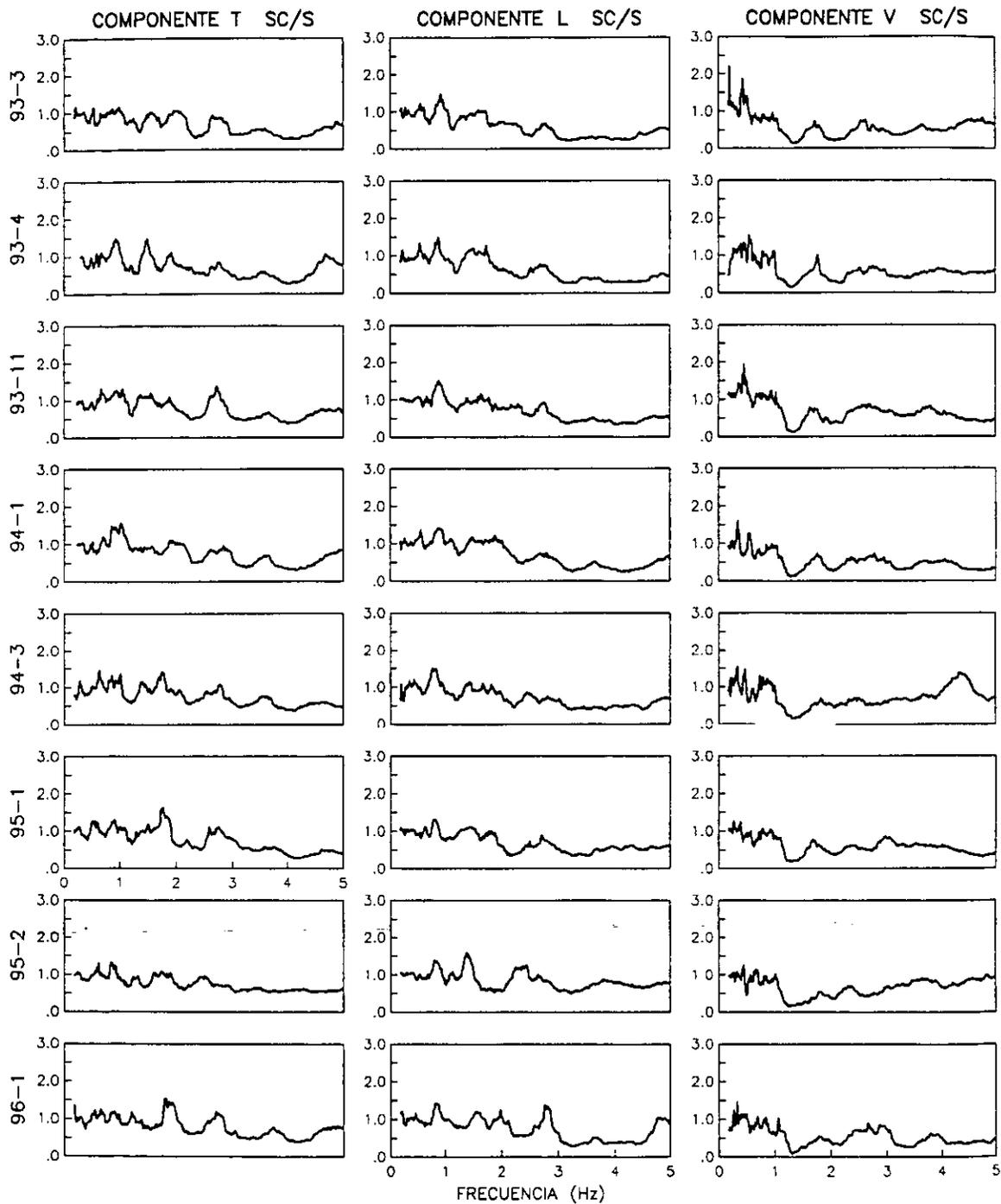
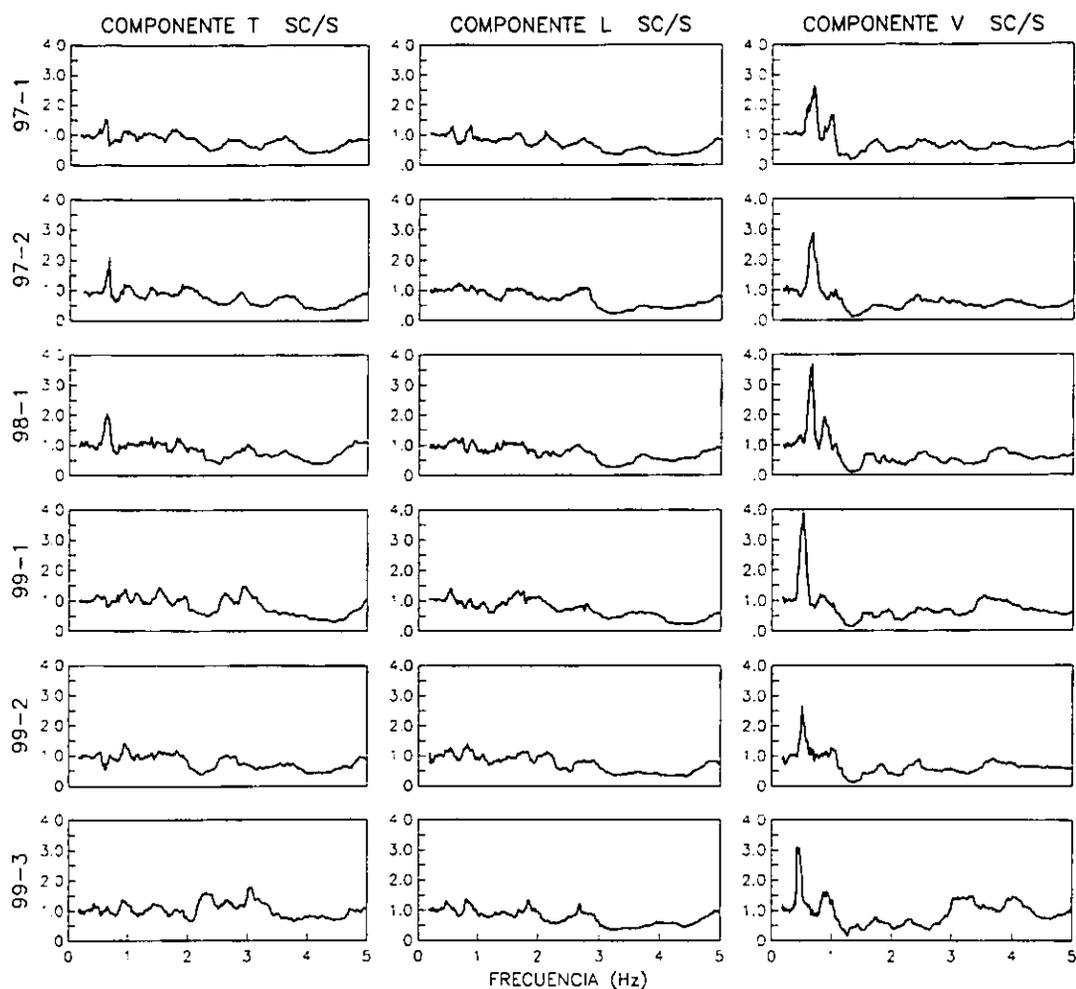


Fig 7.2. Espectros de amplitudes de Fourier de la estación del terreno (S) y el punto (SC) en los componentes T, L y V de los eventos después de la segunda rehabilitación



7.3. Funciones de transferencia de piso en los componentes T, L y V de los eventos antes de la segunda rehabilitación



7.4. Funciones de transferencia de piso en los componentes T, L y V de los eventos después de la segunda rehabilitación

7.1.1. Estimación de las frecuencias con cocientes espectrales

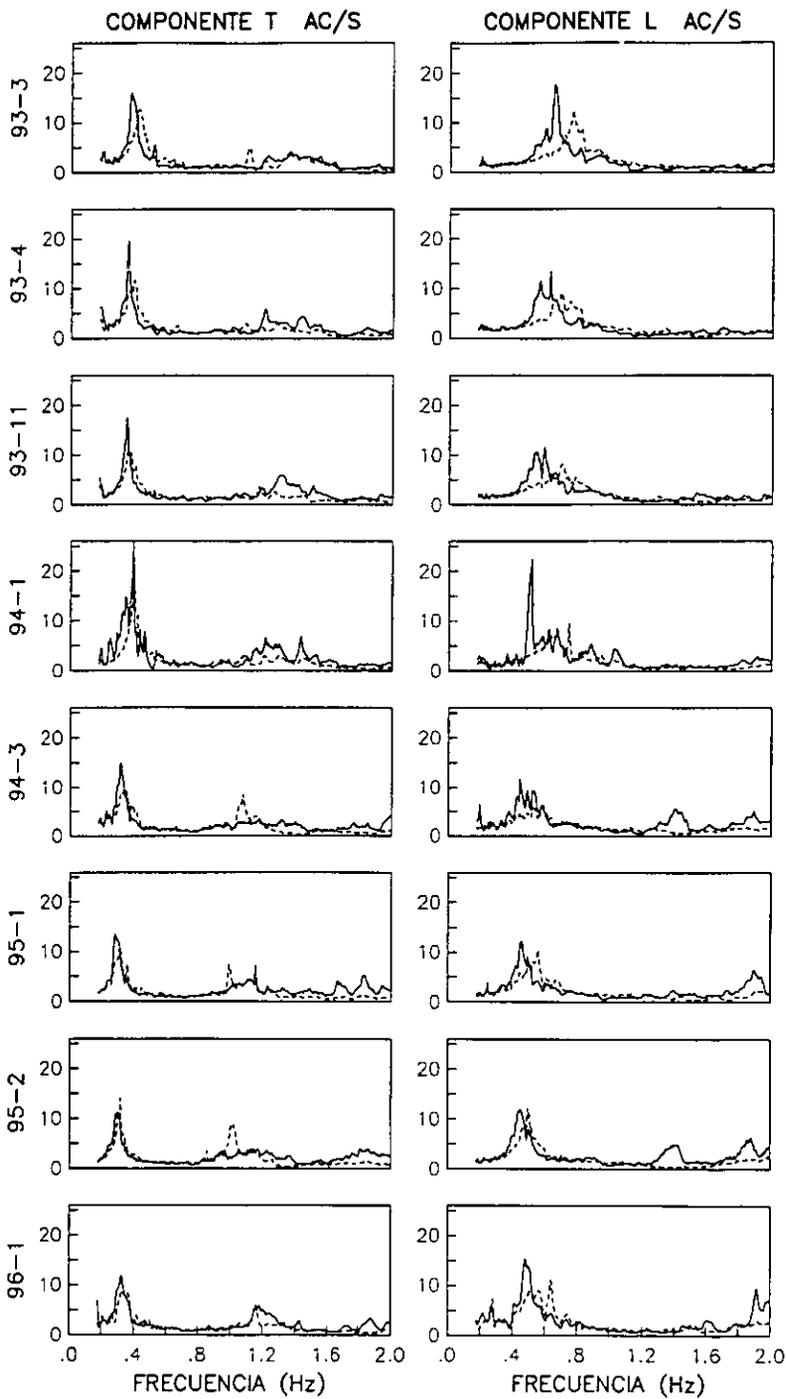
Para identificar la frecuencia fundamental de la estructura con base rígida en los componentes T y L, se calculó el cociente espectral (F_{Te}) (Paolucci, 1993; Meli et al, 1998). En las figs 7.5 y 7.6 se comparan los cocientes F_{Te} con AC/S (usado para identificar la frecuencia fundamental del sistema - capítulo seis -), a fin de establecer diferencias entre estas frecuencias para los eventos analizados. En la tabla 7.1 se presentan las frecuencias identificadas. Se observan disminuciones en la frecuencia fundamental del sistema y de la estructura, y cambios correlacionados con la intensidad del sismo.

La identificación de las frecuencias en el componente L se dificulta por la presencia de varias ordenadas significativas dentro de un intervalo de frecuencias (tabla 7.1), lo cual es un indicativo de las variaciones en las frecuencias de vibración durante un mismo evento evidenciando un comportamiento no lineal.

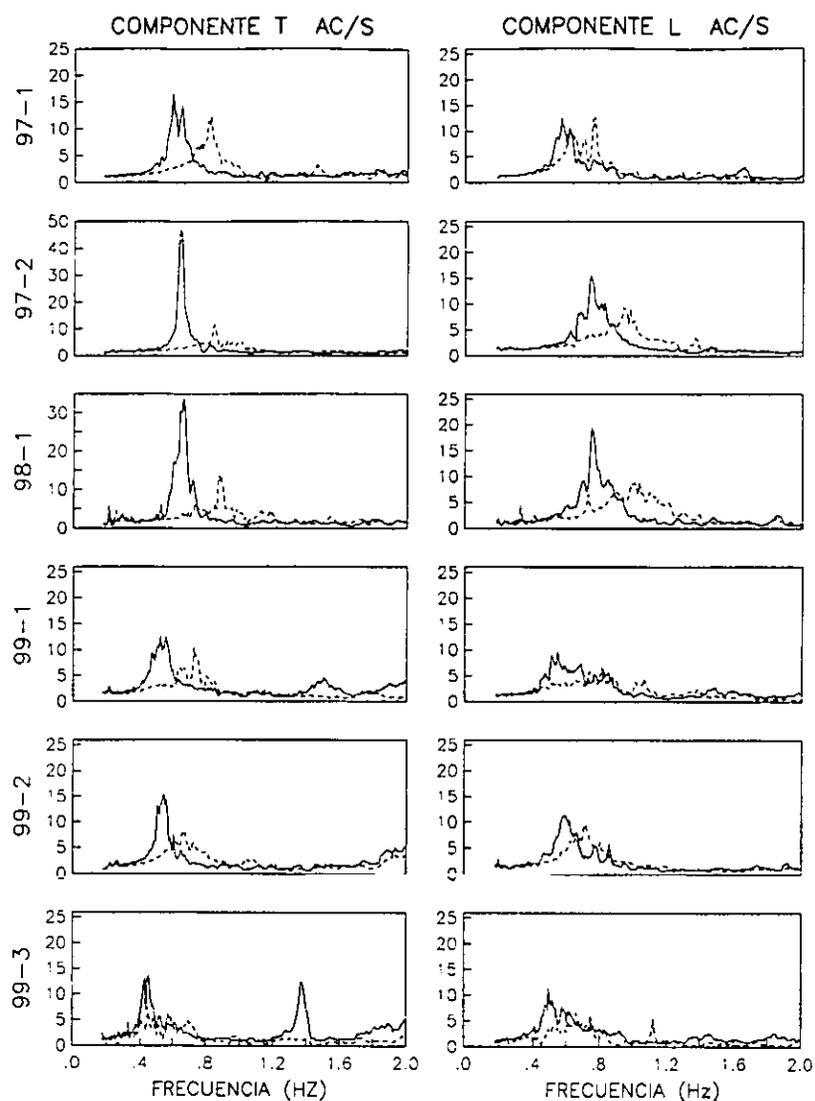
En el componente T se puede observar que las ordenadas espectrales máximas de FTe y AC/S coinciden aproximadamente, razón por la cual las frecuencias del sistema y la estructura son prácticamente las mismas en aquellos eventos ocurridos antes de la segunda rehabilitación. En los eventos posteriores a ésta se observa un corrimiento hacia la derecha en la ordenada espectral máxima de FTe con relación al cociente AC/S, en estos casos la frecuencia de la estructura es mayor que la obtenida para el sistema. En el componente L se observa este corrimiento en los eventos ocurridos tanto antes como después de la segunda rehabilitación.

Tabla 7.1. Frecuencias (Hz) de la estructura (FTe) y del sistema (AC/S)

Evento	FTe		AC/S	
	T	L	T	L
93-3	0.43	0.76	0.37	0.65
93-4	0.38-0.43	0.70-0.76	0.35	0.61
93-11	0.35-0.40	0.70	0.35	0.57
94-1	0.40	0.74	0.37	0.58
94-3	0.30-0.35	0.42-0.60	0.29	0.45
95-1	0.31	0.50-0.56	0.28	0.45
95-2	0.31	0.48-0.52	0.29	0.45
96-1	0.33-0.36	0.52-0.64	0.34	0.48
97-1	0.82	0.61	0.60	0.56
97-2	0.84	0.90-0.96	0.64	0.74
98-1	0.87	0.88-1.20	0.63	0.74
99-1	0.65-0.73	0.73-0.82	0.54	0.52
99-2	0.61-0.68	0.65-0.73	0.54	0.59
99-3	0.45-0.58	0.61-0.74	0.46	0.52



7.5. Funciones de transferencia de los eventos antes de la segunda rehabilitación para identificar la frecuencia fundamental del sistema (\bar{f}_1) y de la estructura (f_1). En línea continua aparece el cociente AC/S (sistema) y en línea discontinua aparece el cociente FTE (estructura)



7.6. Funciones de transferencia de los eventos después de la segunda rehabilitación para identificar la frecuencia fundamental del sistema (\bar{f}_1) y de la estructura (f_1). En línea continua aparece el cociente AC/S (sistema) y en línea discontinua aparece el cociente FTE (estructura)

Las frecuencias debidas al cabeceo de la base, se obtienen de los cocientes espectrales de los registros de aceleración vertical tomados en las esquinas oeste y este del sótano y el registro del sótano centro (SO/SC y SE/SC), y de los tomados en las mismas esquinas de la azotea respecto al registro de la azotea centro (AO/AC y AE/AC). Se señala que estos cocientes tienen en cuenta el movimiento de cabeceo de la base en los dos componentes, no siendo

posible establecer una diferencia entre las frecuencias asociadas a uno y otro separadamente. En las figs 7.7 y 7.8 se muestran los cocientes calculados con los registros del sótano y en las figs 7.9 y 7.10 los calculados con los registros de la azotea. En éstos las ordenadas significativas están asociadas a movimientos relativos al centro de las plantas del sótano y la azotea, respectivamente. Se distinguen cinco intervalos de frecuencias (tabla 7.2):

- El primero abarca de 0.42 a 0.78 Hz, corresponde a movimientos de cabeceo asociados a las frecuencias fundamentales de vibración del sistema.
- El segundo de 0.85 a 1.12 Hz, se identifica en algunos eventos ocurridos antes y después de la rehabilitación.
- El tercero de 1.3 a 1.5 Hz, se distingue en los eventos más intensos de antes de la rehabilitación y en todos los eventos después de la misma.
- El cuarto intervalo se distingue en los eventos más intensos (1.65 a 1.93 Hz).
- El quinto intervalo de 2.1 a 2.6 Hz se distingue en todos los eventos y parece estar acoplado a la segunda frecuencia característica del componente V (Murià Vila y Rodríguez Gutiérrez, 2001).

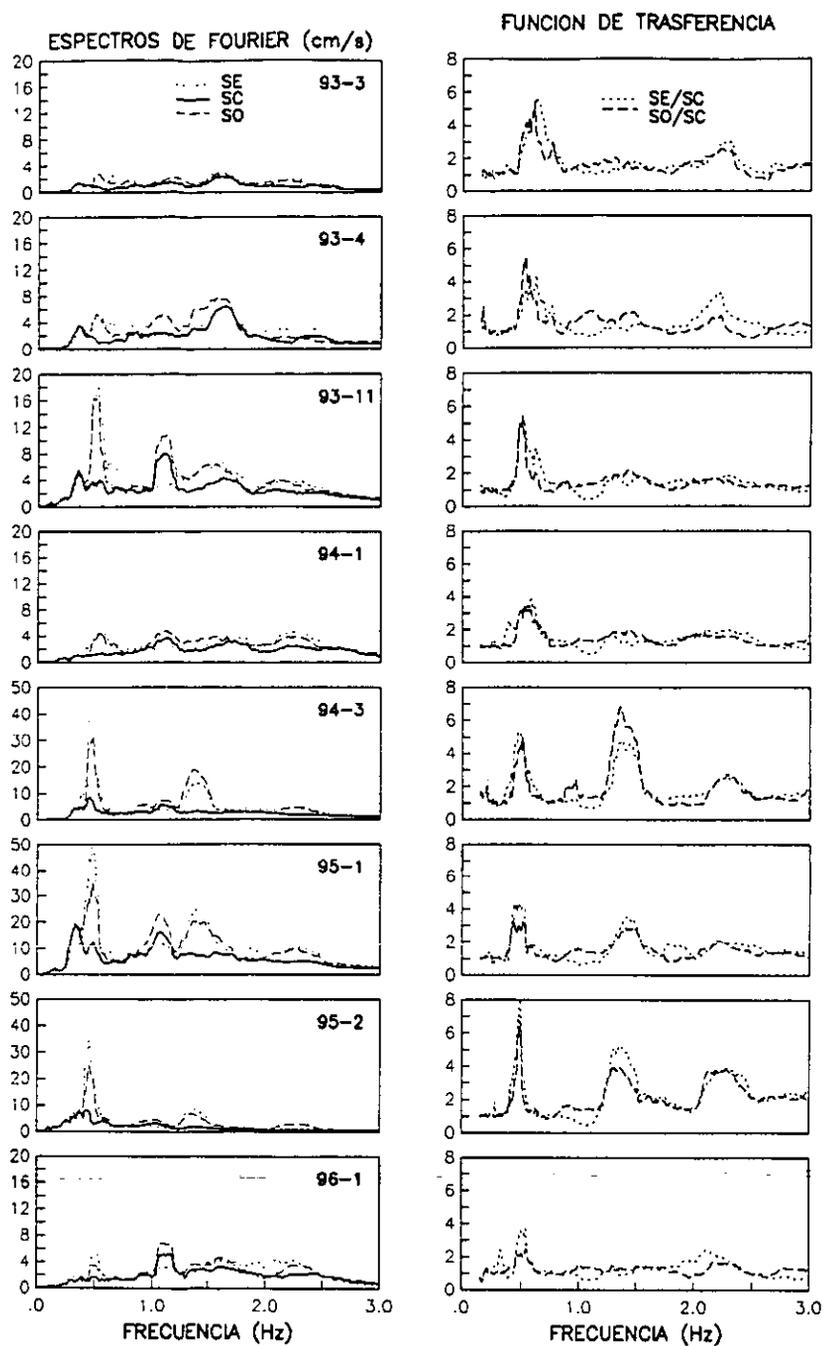


Fig 7.7. Espectros de amplitudes de Fourier de los puntos SE, SC y SO, y funciones de transferencia SE/SC y SO/SC en el componente V de los eventos antes de la segunda rehabilitación

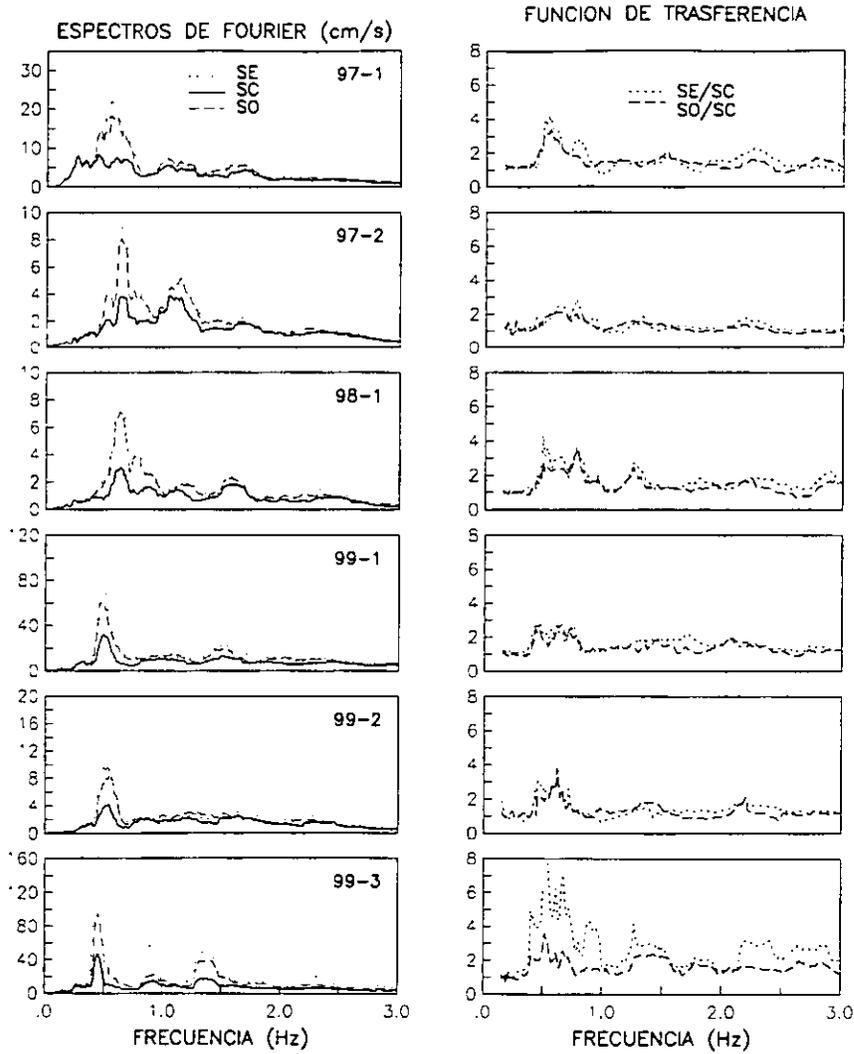


Fig 7.8. Espectros de amplitudes de Fourier de los puntos SE, SC y SO, y funciones de transferencia SE/SC y SO/SC en el componente V de los eventos después de la segunda rehabilitación

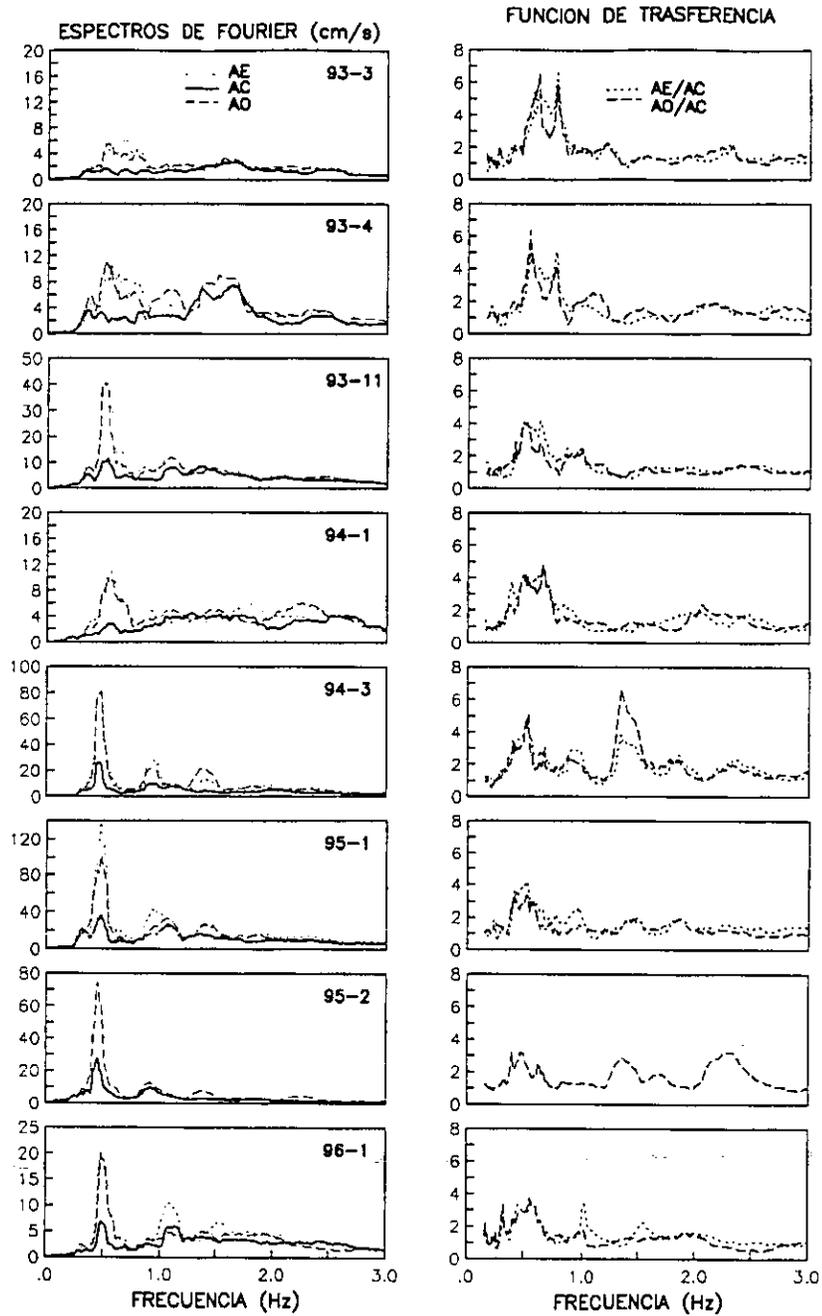


Fig 7.9. Espectros de amplitudes de Fourier de los puntos AE, AC y AO, y funciones de transferencia AE/AC y AO/AC en el componente V de los eventos antes de la segunda rehabilitación

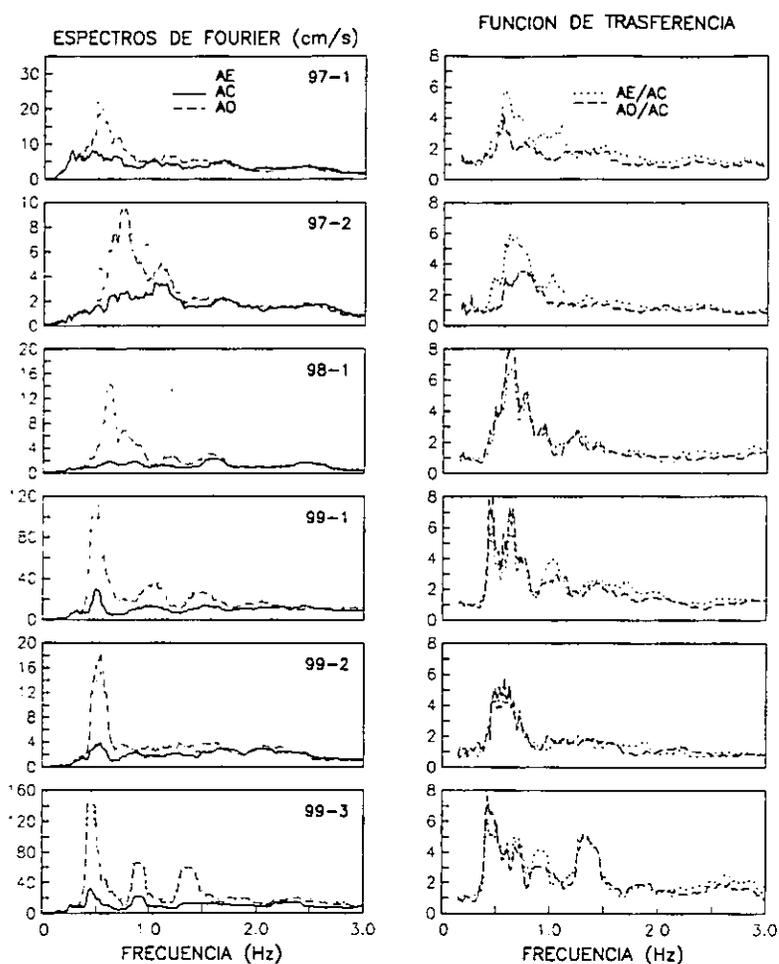


Fig 7.10. Espectros de amplitudes de Fourier de los puntos AE, AC y AO, y funciones de transferencia AE/AC y AO/AC en el componente V de los eventos después de la segunda rehabilitación

Tabla 7.2 Frecuencias de cabeceo identificadas con los cocientes espectrales SO/SC, SE/SC, AO/AC y AE/AC de los eventos analizados

Evento	Nivel	Intervalos de frecuencias (Hz)				
		1	2	3	4	5
93-3	Azotea	0.49-0.76	1.00	--	--	2.15-2.35
	Sótano	0.49-0.62	--	--	--	2.15-2.35
93-4	Azotea	0.49-0.76	1.00-1.08	--	--	2.10-2.23
	Sótano	0.49-0.62	1.00-1.08	--	--	2.15-2.23
93-11	Azotea	0.49-0.64	0.98	--	--	2.30-2.60
	Sótano	0.49-0.62	--	--	--	2.15-2.35
94-1	Azotea	0.49-0.70	--	--	--	2.00-2.50
	Sótano	0.49-0.58	--	--	--	2.10-2.23
94-3	Azotea	0.42-0.67	0.85-1.01	1.30-1.50	1.82-1.86	2.15-2.50
	Sótano	0.47-0.52	0.85-0.98	1.30-1.55	--	2.15-2.35
95-1	Azotea	0.42-0.64	0.90-0.95	1.40-1.50	1.84-1.86	--
	Sótano	0.42-0.52	0.90-0.95	1.35-1.50	--	2.10-2.35
95-2	Azotea	0.47-0.62	--	1.30-1.43	1.65-1.70	2.10-2.35
	Sótano	0.48-0.51	--	--	--	2.10-2.35
96-1	Azotea	0.46-0.62	1.02	--	--	--
	Sótano	0.46-0.52	1.02	--	--	2.10-2.35
97-1*	Azotea	0.50-0.70	0.90-1.12	--	--	--
	Sótano	0.49-0.78	--	--	--	2.25-2.35
97-2*	Azotea	0.50-0.78	1.01	1.30-1.32	--	--
	Sótano	0.49-0.76	--	1.30-1.32	--	2.15-2.35
98-2*	Azotea	0.50-0.78	0.90-0.92	1.30-1.32	--	--
	Sótano	0.49-0.78	--	1.30-1.32	--	2.25-2.35
99-1*	Azotea	0.43-0.65	1.05	1.40-1.48	1.73	--
	Sótano	0.43-0.76	0.93	1.32-1.48	1.70	2.06-2.28
99-2*	Azotea	0.46-0.67	0.98	1.15-1.28	1.90	--
	Sótano	0.45-0.71	0.98	1.29-1.45	--	2.20-2.45
99-3*	Azotea	0.42-0.72	0.91-0.97	1.30-1.40	1.80-1.93	--
	Sótano	0.40-0.67	0.91-0.95	1.27-1.53	1.81-1.93	2.21-2.41

* eventos ocurridos después de la segunda rehabilitación

7.1.2. Estimación de las frecuencias con el modelo de Luco

Para la estimación de las frecuencias de traslación y cabeceo y la torsión debidas a los efectos ISE, se adoptó el procedimiento espectral propuesto por Mendoza, *et al* (1991). El modelo usado en este análisis, se presentó en el capítulo 4 (fig 4.1). Se obtuvieron los espectros de Fourier de las señales de traslación total en la azotea, traslación relativa de la base y cabeceo de la base. Con dichos espectros y conocido el valor de la frecuencia del sistema suelo-estructura (\bar{f}_1) se obtienen las ordenadas X_T , X_0 y $H\phi$ de cada espectro asociadas a la frecuencia (\bar{f}_1) de cada ventana. De las ecuaciones 4.23, 4.24 y 4.27 se

obtienen las frecuencias de cabeceo de la base (f_c), traslación de la base (f_H) y la frecuencia de la estructura (f_1), respectivamente. Los valores de los parámetros M_i , γ_i y β_i , fueron los que aparecen en la tabla 7.3 .

Las tablas 7.4 y 7.5 presentan las frecuencias del sistema, los porcentajes de participación de la traslación (X_0 X_T) y el cabeceo ($H\phi$ X_T) de la base en la respuesta total de traslación de la estructura, las frecuencias de traslación(f_H) y cabeceo(f_c) de la base y la frecuencia identificada de la estructura (f_1), las rigideces equivalentes de traslación horizontal (K_H) y cabeceo (K_c) y por último las relaciones entre las frecuencias identificadas para el sistema y la estructura $\left(\frac{f_1}{f_1}\right)$ y para la traslación y el cabeceo de la base $\left(\frac{f_H}{f_c}\right)$.

Con los cocientes X_0 X_T y $H\phi$ X_T se estima la contribución total de los efectos ISE a la respuesta de traslación de la estructura. El análisis de éstos conduce a las siguientes observaciones:

- Antes de la rehabilitación, se aprecia una reducción en las contribuciones por cabeceo de los eventos más intensos y que produjeron daños visibles al edificio (94-3, 95-1 y 95-2), con relación a los dos eventos iniciales de pequeña intensidad, de 9 a 6 por ciento en T y de 21 a 11 por ciento en L. Lo anterior indica, que los movimientos en la base debido a los efectos ISE contribuyen en menor proporción en la respuesta del edificio en la medida que las amplitudes de las solicitaciones son mayores, siendo más notorias en el componente L, lo cual se debe a que en este componente se encuentran los muros de mampostería de las fachadas laterales, que al disminuir su participación en la respuesta lateral hace que se produzcan mayores deformaciones estructurales.
- Se observa que concluida la rehabilitación del edificio existe una mayor contribución de los efectos ISE superando las obtenidas antes de la rehabilitación y reflejando los cambios en la estructura principalmente en el componente T. Se tuvieron contribuciones que variaron entre 17 y 29 por ciento para el componente T y entre

12 y 21 por ciento en el componente L. En este último las contribuciones se mantuvieron en función de la intensidad de la sollicitación.

- La participación en traslación de la base en la respuesta de la estructura es poca. Para los eventos de antes de la rehabilitación fue inferior a dos por ciento en el componente T e inferior al cinco por ciento en el componente L, razón por la cual se nota que los efectos ISE por traslación de la base son despreciables.
- En todos los casos los efectos de cabeceo fueron mayores que los de traslación de la base.

Tabla 7.3. Parámetros para estimación de las frecuencias ISE con el modelo de Luco

Parámetros	Antes de la segunda rehabilitación			Después de la segunda rehabilitación		
	T	L	Torsión	T	L	Torsión
M_1 (t s ² /m)	318	272	-	376	321	-
γ_1	0.93	1.01	-	0.93	1.01	-
β_1	1.35	1.41	1.49	1.36	1.43	1.43
I_1 (t m/s ²)	-	-	33900	-	-	56211

Tabla 7.4. Características dinámicas de traslación en el componente T, estimadas con el modelo de Luco

Evento	f_1 (Hz)	X_0/X_T	$H\phi/X_T$	f_H (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	K_H (10 ³ t m)	K_c (10 ⁶ t m/rad)	$\frac{f_1}{\bar{f}_1}$	$\frac{f_H}{f_c}$
93-3	0.37	1	9	2.69	1.26	0.39	166	31	1.05	2.13
93-4	0.35	2	8	2.41	1.31	0.37	133	34	1.06	1.84
93-11	0.35	2	7	2.16	1.33	0.37	106	35	1.06	1.62
94-1	0.37	2	8	2.59	1.32	0.39	153	34	1.05	1.96
94-3	0.29	2	6	1.72	1.19	0.30	67	28	1.03	1.45
95-1	0.28	2	6	1.72	1.18	0.29	68	27	1.04	1.46
95-2	0.29	2	6	1.78	1.21	0.30	73	29	1.03	1.47
96-1**	0.34	2	7	2.11	1.36	0.37	102	36	1.09	1.55
97-1**	0.60	6	26	2.06	1.20	0.73	117	33	1.22	1.72
97-2*	0.64	5	29	2.43	1.22	0.79	163	35	1.23	1.99
98-1*	0.63	6	28	2.15	1.22	0.78	127	35	1.24	1.76
99-1*	0.54	2	25	3.15	1.13	0.63	272	29	1.16	2.79
99-2*	0.54	4	22	2.43	1.20	0.63	162	33	1.16	2.03
99-3*	0.45	4	17	2.00	1.12	0.51	109	29	1.13	1.78

Tabla 7.5. Características dinámicas de traslación en el componente L, estimadas con el modelo de Luco

Evento	f_1 (Hz)	X_o/X_T	$H\phi/X_T$	f_H (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	K_H (10^3 t m)	K_c (10^6 t m/rad)	$\frac{f_1}{f_1}$	$\frac{f_H}{f_c}$
93-3	0.65	3	21	3.07	1.40	0.75	202	39	1.15	2.19
93-4	0.61	4	19	2.74	1.39	0.70	160	38	1.15	1.97
93-11	0.57	5	17	2.14	1.38	0.65	98	38	1.14	1.55
94-1	0.58	3	15	3.06	1.51	0.65	200	45	1.12	2.03
94-3	0.45	3	11	2.06	1.37	0.49	91	37	1.09	1.50
95-1	0.45	2	13	2.57	1.26	0.49	141	31	1.09	2.04
95-2	0.45	1	15	3.40	1.33	0.49	246	35	1.09	2.56
96-1**	0.48	2	8	3.14	1.66	0.51	212	55	1.06	1.89
97-1**	0.56	3	12	2.77	1.62	0.61	200	61	1.09	1.71
97-2*	0.74	3	20	3.44	1.65	0.85	307	64	1.15	2.08
98-1*	0.74	3	21	3.38	1.51	0.86	297	60	1.16	2.24
99-1*	0.52	5	14	1.93	1.38	0.58	96	44	1.13	1.40
99-2*	0.59	3	17	2.82	1.44	0.67	205	48	1.13	1.95
99-3*	0.52	3	18	2.70	1.23	0.59	189	35	1.13	2.20

La relación de frecuencias de la estructura con base empotrada y del sistema es otro indicador de los efectos ISE (tablas 7.4 y 7.5). De estas relaciones se puede ver también que los efectos ISE son más significativos en la respuesta del edificio rehabilitado, siendo más evidente en el componente T para el cual la relación de frecuencias previa a la rehabilitación estuvo entre 1.03 y 1.06 y para después de la rehabilitación varió entre 1.13 y 1.24. En el componente L las relaciones de frecuencias variaron entre 1.09 y 1.15 antes de la rehabilitación y entre 1.09 y 1.16 después de la misma. Se observa según estas variaciones

que los valores de la relación $\left(\frac{f_1}{f_1}\right)$ son cercanos a uno, cuando los efectos ISE no son muy

representativos y llegan a valores de 1.3, cuando se tienen contribuciones por cabeceo

cercanas a 30 por ciento. Así mismo, para la relación $\left(\frac{f_H}{f_c}\right)$ se tuvieron valores que variaron de

1.40 a 2.56, con un valor puntual de 2.79 para una contribución por cabeceo de 25 por ciento y por traslación de la base de dos por ciento. Los valores encontrados para las dos relaciones mencionadas, coinciden con los reportados en estudios analíticos de efectos ISE (Esteva y Mendoza, 1989).

De los comentarios anteriores se puede notar una gran sensibilidad de los efectos ISE con la intensidad de la sollicitación, las variaciones en las características estructurales por deterioro y los trabajos de rehabilitación.

De las ecuaciones 4.27 y 4.28 se obtiene las frecuencias de torsión de la estructura (f_{it}) y la de torsión del sistema si sólo pudiera girar en su plano (f_R), respectivamente. Los valores de los parámetros I_i y β_i , usados para identificar estas frecuencias aparecen en la tabla 7.3.

En la tabla 7.6 se presentan las características dinámicas de torsión del edificio estimadas con el modelo de Luco, la relación entre la rotación de la base con respecto a la rotación total de la azotea (ϕ_{bt}/ϕ_{Rt}) y la relación entre las frecuencias identificadas de torsión para la estructura con base empotrada y para el sistema $\left(\frac{f_{it}}{\bar{f}_{it}}\right)$.

Tabla 7.6. Características dinámicas de torsión estimadas con el modelo de Luco

Evento	\bar{f}_{it} (Hz)	ϕ_{bt}/ϕ_R	f_R (Hz)	f_{it} (Hz)	K_R (10^6 t m/rad)	$\frac{f_{it}}{\bar{f}_{it}}$
93-3	0.60	5	2.31	0.62	14	1.03
93-4	0.56	4	2.32	0.58	14	1.04
93-11	0.53	5	1.97	0.55	10	1.04
94-1	0.51	5	1.95	0.52	10	1.02
94-3	0.43	2	2.48	0.44	16	1.02
95-1	0.43	3	2.16	0.43	12	1.00
95-2	0.46	1	3.36	0.46	10	1.00
96-1**	0.48	2	3.03	0.48	24	1.00
97-1**	1.15	6	3.91	1.18	70	1.03
97-2*	1.25	9	3.43	1.34	54	1.07
98-1*	1.29	11	3.20	1.41	46	1.09
99-1*	0.99	4	4.12	1.03	77	1.03
99-2*	1.01	14	2.24	1.14	23	1.12
99-3*	0.92	17	1.86	1.05	16	1.15

Del análisis de la tabla 7.6 se tienen las siguientes observaciones:

- Antes de la rehabilitación se aprecia que en los eventos que ocasionaron daños visibles al edificio (94-3, 95-1 y 95-2) la contribución de los efectos ISE en la respuesta total de Torsión (ϕ_{bt} , ϕ_{Rt}) se reduce, con relación a los dos eventos iniciales de pequeña intensidad, de cinco a tres por ciento.
- La relación de las frecuencias de torsión de la estructura y del sistema antes de la rehabilitación varió de 1.00 a 1.03, ésto significa que la estructura se comportó como si estuviera empotrada en su base.
- Concluida la rehabilitación la contribución media de los efectos ISE por torsión fue de 10 por ciento. La relación de las frecuencias de torsión de la estructura y del sistema fue de 1.03 a 1.15 con lo cual son notorios los efectos ISE.

Del análisis de los registros sísmicos se puede ver que las variaciones de las frecuencias de la estructura y de los efectos ISE no solamente están relacionadas con los daños estructurales y la restructuración, sino que aparentemente hay efectos no lineales por contacto entre la cimentación y el suelo.

Modelo simplificado de Luco por ventanas

Debido a al comportamiento no lineal que se evidenció en los análisis del sistema suelo estructura, el cual puede atribuirse esencialmente a cambios en rigidez debido a diferentes niveles de deterioro de los elementos estructurales y no estructurales y a la rehabilitación del edificio, se decidió hacer un análisis más detallado de los efectos ISE usando el modelo simplificado. Para este análisis se seleccionaron los eventos más importantes ocurridos antes (93-11, 94-3, 95-1 y 95-2) y después (97-1, 97-2, 99-1, 99-2 y 99-3) de la segunda rehabilitación. Los eventos 97-2 y 99-2 fueron eventos de poca intensidad pero se consideraron por haber ocurrido entre dos eventos intensos (99-1 y 99-3). Se hizo un análisis de Fourier con ventanas móviles de 10 s con el fin de determinar la variación de parámetros para cada evento. En las tablas 7.7 y 7.8 se presentan los valores máximo, mínimo y promedio de los parámetros identificados con este método, así como también el porcentaje de reducción en la frecuencia del sistema y la identificada de la estructura y de cabeceo de la

base para cada evento en los dos componentes de análisis. No se hizo este análisis para la frecuencia de traslación de la base debido a la baja calidad de las señales por la poca contribución de ésta a la respuesta de la estructura.

Tabla 7.7. Características dinámicas de traslación en el componente T, estimadas con el modelo de Luco con ventanas de 10 s

Evento	Parámetros	\dot{f}_1 (Hz)	X_o/X_T	$H\phi/X_T$	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	K_H (10^3 t m)	K_c (10^6 t m/rad)	$\frac{f_1}{\dot{f}_1}$
ANTES DE LA SEGUNDA REHABILITACIÓN									
93-11	Mínimo	0.35	0.01	0.06	1.29	0.36	19	33	1.04
	Máximo	0.41	0.11	0.11	1.53	0.45	192	45	1.12
	Promedio	0.37	0.04	0.08	1.40	0.39	76	38	1.07
	Reducción (%)	-17			-15	-20			
94-3	Mínimo	0.30	0.02	0.06	1.12	0.32	25	24	1.05
	Máximo	0.38	0.07	0.10	1.38	0.42	120	37	1.10
	Promedio	0.33	0.04	0.08	1.23	0.35	55	30	1.07
	Reducción (%)	-22			-19	-22			
95-1	Mínimo	0.30	0.01	0.05	1.07	0.31	19	22	1.04
	Máximo	0.37	0.09	0.11	1.43	0.40	109	40	1.10
	Promedio	0.31	0.04	0.07	1.26	0.33	63	31	1.06
	Reducción (%)	-19			-25	-22			
95-2	Mínimo	0.30	0.01	0.04	1.11	0.31	33	24	1.03
	Máximo	0.35	0.05	0.08	1.55	0.36	139	47	1.06
	Promedio	0.31	0.02	0.06	1.32	0.33	84	34	1.05
	Reducción (%)	-14			-28	-14			
DESPUÉS DE LA SEGUNDA REHABILITACIÓN									
97-1	Mínimo	0.61	0.03	0.26	1.16	0.75	76	31	1.20
	Máximo	0.71	0.11	0.34	1.34	0.89	294	42	1.32
	Promedio	0.65	0.08	0.30	1.25	0.84	126	36	1.28
	Reducción (%)	-13			-13	-16			
97-2	Mínimo	0.66	0.03	0.30	1.23	0.81	148	35	1.23
	Máximo	0.73	0.06	0.35	1.31	0.92	412	40	1.27
	Promedio	0.70	0.04	0.33	1.27	0.88	261	37	1.25
	Reducción (%)	-10			-6	-12			
99-1	Mínimo	0.48	0.02	0.19	1.03	0.55	62	25	1.13
	Máximo	0.67	0.14	0.31	1.28	0.90	305	38	1.36
	Promedio	0.56	0.05	0.25	1.16	0.67	185	31	1.19
	Reducción (%)	-28			-19	-39			
99-2	Mínimo	0.53	0.02	0.22	1.17	0.61	67	32	1.14
	Máximo	0.60	0.11	0.26	1.24	0.77	378	35	1.28
	Promedio	0.56	0.04	0.23	1.21	0.65	187	34	1.17
	Reducción (%)	-12			-6	-21			
99-3	Mínimo	0.43	0.01	0.17	0.99	0.48	45	22	1.10
	Máximo	0.52	0.08	0.23	1.19	0.60	375	33	1.17
	Promedio	0.45	0.04	0.20	1.07	0.52	148	26	1.14
	Reducción (%)	-17			-17	-20			

Tabla 7.8. Características dinámicas de traslación en el componente L, estimadas con el modelo de Luco en ventanas de 10 s

Evento	Parámetros	\bar{f}_1 (Hz)	X_o/X_T	$H\phi/X_T$	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	K_H (10^3 t m)	K_c (10^6 t m/rad)	$\frac{f_1}{\bar{f}_1}$
ANTES DE LA SEGUNDA REHABILITACIÓN									
93-11	Mínimo	0.51	0.01	0.14	1.27	0.57	96	32	1.09
	Máximo	0.70	0.05	0.24	1.41	0.82	446	39	1.18
	Promedio	0.58	0.03	0.18	1.36	0.66	235	36	1.14
	Reducción (%)	-27			-10	-31			
94-3	Mínimo	0.46	0.01	0.11	1.21	0.50	43	29	1.08
	Máximo	0.61	0.13	0.18	1.44	0.76	292	41	1.26
	Promedio	0.50	0.04	0.14	1.34	0.56	133	35	1.12
	Reducción (%)	-24			-16	-35			
95-1	Mínimo	0.44	0.01	0.11	1.24	0.48	65	30	1.08
	Máximo	0.63	0.08	0.15	1.67	0.73	504	55	1.16
	Promedio	0.48	0.03	0.12	1.36	0.53	182	36	1.09
	Reducción (%)	-29			-26	-34			
95-2	Mínimo	0.45	0.01	0.11	1.30	0.48	113	33	1.07
	Máximo	0.53	0.03	0.13	1.50	0.57	324	44	1.09
	Promedio	0.47	0.02	0.11	1.38	0.51	221	38	1.08
	Reducción (%)	-16			-13	-16			
DESPUÉS DE LA SEGUNDA REHABILITACION									
97-1	Mínimo	0.59	0.03	0.07	1.90	0.63	59	84	1.08
	Máximo	0.67	0.11	0.11	2.27	0.74	235	120	1.15
	Promedio	0.61	0.06	0.09	2.03	0.67	138	96	1.10
	Reducción (%)	-13			-16	-14			
97-2	Mínimo	0.73	0.01	0.15	1.76	0.82	194	72	1.11
	Máximo	0.82	0.06	0.20	1.92	0.97	941	86	1.19
	Promedio	0.78	0.03	0.17	1.85	0.88	470	80	1.13
	Reducción (%)	-11			-9	-16			
99-1	Mínimo	0.53	0.02	0.13	1.35	0.59	70	42	1.11
	Máximo	0.87	0.09	0.26	1.69	1.04	518	66	1.21
	Promedio	0.64	0.05	0.18	1.49	0.74	201	52	1.16
	Reducción (%)	-39			-20	-43			
99-2	Mínimo	0.60	0.01	0.16	1.41	0.67	78	46	1.11
	Máximo	0.64	0.10	0.19	1.57	0.77	466	57	1.20
	Promedio	0.62	0.04	0.18	1.47	0.71	213	50	1.15
	Reducción (%)	-6			-10	-13			
99-3	Mínimo	0.49	0.02	0.15	0.99	0.56	86	23	1.12
	Máximo	0.61	0.06	0.28	1.35	0.75	308	42	1.25
	Promedio	0.53	0.04	0.23	1.13	0.63	157	30	1.18
	Reducción (%)	-20			-27	-25			

De las tablas 7.7 y 7.8 se derivan las siguientes observaciones:

Se presentaron variaciones significativas tanto en la frecuencia del sistema como de la estructura, las cuales fueron más notorias en los eventos más intensos. En el componente T las reducciones en la frecuencia del sistema variaron entre 14 y 22 por ciento y entre 14 y 20 por ciento para la estructura. Después de la rehabilitación las variaciones en la frecuencia del sistema estuvieron entre 10 y 28 por ciento y entre 12 y 39 por ciento para la estructura, teniéndose las mayores en el evento 99-1. En los eventos ocurridos antes de la primera rehabilitación, las variaciones fueron similares para la frecuencia del sistema y la estructura. Sin embargo, en los ocurridos después las reducciones fueron mayores en la estructura que en el sistema. Las relaciones mínimas entre las frecuencias coincidieron aproximadamente con las obtenidas del modelo simplificado para la señal completa.

En el componente L las reducciones en la frecuencia del sistema para antes de la rehabilitación variaron entre 16 y 29 por ciento y entre 16 y 35 por ciento en la frecuencia de la estructura. Después de la rehabilitación las variaciones en el sistema estuvieron entre 11 y 39 por ciento, y entre 13 y 43 por ciento para la estructura, teniéndose las mayores en el evento 99-1. En los eventos ocurridos antes de la primera rehabilitación las variaciones fueron similares. Sin embargo, en los ocurridos después las reducciones fueron mayores en la frecuencia de la estructura que en la del sistema. Las relaciones mínimas coincidieron aproximadamente con las obtenidas del modelo simplificado para la señal completa.

7.2. Estimación paramétrica (EP)

Se analizan los modelos descritos en el capítulo cuatro para identificar las propiedades de los componentes del sistema suelo-estructura (traslación de la estructura y cabeceo de la base) usando el planteamiento modal.

La estimación paramétrica permitió hacer un análisis de las señales por tramos con el fin de determinar cambios y variaciones en las propiedades mencionadas. Se usaron ventanas de 10 s; en algunas de ellas, cuyas señales fueron de baja amplitud y pobres en el contenido frecuencial, no fue posible la identificación de parámetros, principalmente en los modelos asociados con el cabeceo de la cimentación.

Se estimaron las frecuencias fundamentales de vibrar, los factores de participación en la respuesta de cada frecuencia identificada y los errores totales en la identificación para los componentes T y L.

Para la estructura se estimó la frecuencia del primer modo y para el cabeceo se estimaron entre tres y cinco frecuencias asociadas con las frecuencias del sistema, la estructura y el cabeceo propio de la base.

Se descartaron los análisis para la traslación de la base ya que no se lograba una adecuada identificación, y esto se atribuye a la poca participación de la traslación de la base en la respuesta de la estructura.

7.2.1. Estimación de las frecuencias de la estructura

Las frecuencias fundamentales de la estructura, en los componentes T y L, se determinaron mediante el modelo de un grado de libertad 1NIGACE, ya que de los análisis para la identificación de las propiedades del sistema se demostró que con modelos simplificados que sólo consideran un instrumento en la azotea además del instrumento del terreno, se obtenían adecuadamente las frecuencias, incluso de modos superiores, y considerando que los efectos ISE tienen mayor importancia cuando se trata de la frecuencia fundamental de vibrar (Jennings y Bielak, 1973). Los eventos analizados ocurridos antes de la segunda rehabilitación fueron 93-11, 94-3, 95-1, y 95-2 y los ocurridos después fueron 97-1, 97-2, 99-1, 99-2 y 99-3.

En las figs 7.11 a 7.14 se presentan los parámetros estimados para la estructura en las cuales se muestran las señales relativas de la azotea correspondientes a la respuesta de la estructura, los factores de participación (FP) y los errores totales en la identificación asociados con las frecuencias identificadas y por último, se presentan simultáneamente las frecuencias de la estructura en el primer modo comparadas con las del modelo de Luco por ventanas, de los cocientes espectrales FTe y de los análisis paramétricos del sistema \bar{f}_1 .

En el componente T para los eventos antes de la segunda rehabilitación (fig 7.11) se observa una variación importante en los errores y factores de participación. Se destaca una

participación menor de la frecuencia de la estructura al inicio de los eventos con un error alto en la identificación, encontrando que en la medida en que los primeros son más altos los errores disminuyen. Con relación a la amplitud de la señal no se ve una relación directa con los factores de participación. Sin embargo, se ve que en los tramos donde hay menos variaciones significativas en la amplitud de las señales se tiene mayor uniformidad en los factores de participación encontrados. Las frecuencias varían a lo largo de los cuatro eventos, evidenciando una respuesta no lineal de la estructura. Se tienen algunas ventanas en las cuales se tuvieron dificultades para identificar la frecuencia, por lo tanto estos valores se descartaron.

Se puede observar que las frecuencias identificadas son similares a las encontradas con el modelo de Luco por ventanas y similares o, en algunas ventanas, ligeramente mayores que las frecuencias del sistema. Las frecuencias del sistema y de la estructura con base rígida son prácticamente las mismas y menores que la frecuencia dominante del suelo.

En el componente L (fig 7.12), se observa una variación mayor en las frecuencias con relación a T. Se nota una mejor correlación de las señales con los errores y factores de participación encontrados. En las fases más intensas se tuvieron menores errores asociados con altas participaciones. Se observó que al inicio de los eventos las participaciones de las frecuencias de la estructura fueron menores y se incrementaron hasta el final de evento encontrando participaciones cercanas al 100 por ciento. En general se obtuvieron porcentajes de error aceptables inferiores al 30 por ciento.

Las frecuencias identificadas disminuyeron del comienzo al final del evento. En el evento 93-11 hay una fuerte disminución comenzando en una frecuencia de 0.8 Hz y termina en un valor cercano a 0.6 Hz, manteniéndose en todo el evento por encima de la frecuencia dominante del suelo. Para los eventos 95-1 y 95-2 la disminución de la frecuencia es hasta un valor cercano a 0.5 Hz que es la frecuencia dominante del sitio. Se encontraron frecuencias similares a las del modelo de Luco por ventanas y ligeramente mayores que las frecuencias del sistema. En L los efectos ISE tienen mayor importancia que en el componente T.

En los eventos ocurridos después de la segunda rehabilitación (figs 7.13 y 7.14) hay un cambio evidente en el comportamiento de la estructura. Se nota una separación importante entre las frecuencias de traslación de la estructura y del sistema, siendo las primeras, significativamente mayores. Por lo anterior se nota un incremento en la importancia de los efectos ISE para estos eventos principalmente en el componente T.

Tanto en el componente T como L, se nota una correlación entre las amplitudes de las señales y los errores encontrados. Cuando se tienen mayores amplitudes los errores son menores y los factores de participación altos. Los mayores errores se presentaron al comienzo de los eventos.

En la fig 7.13 para el componente T se nota un comportamiento cuasi-lineal en los eventos 97-1 y 97-2 con valores de frecuencia entre 0.8 Hz y 0.9 Hz al igual que el evento 99-2 con valores alrededor de 0.65 Hz similares a los encontrados con el modelo simplificado y con FTe. En los eventos 99-1 y 99-3, a causa de las no linealidades, es donde se presentan las mayores diferencias entre las frecuencias encontradas con EP, el modelo de Luco por ventanas y FTe. Entre el modelo simplificado y el paramétrico existe congruencia, salvo en algunos valores en los que la frecuencia identificada con el método paramétrico resulta mayor, principalmente al inicio del evento.

En el componente L, el comportamiento de la estructura resulta similar al de aquellos eventos ocurridos antes de la segunda rehabilitación en los cuales la frecuencia identificada para la estructura resulta ser ligeramente mayor que la frecuencia del sistema. Se nota una buena aproximación de las frecuencias a las obtenidas con el modelo de Luco por ventanas.

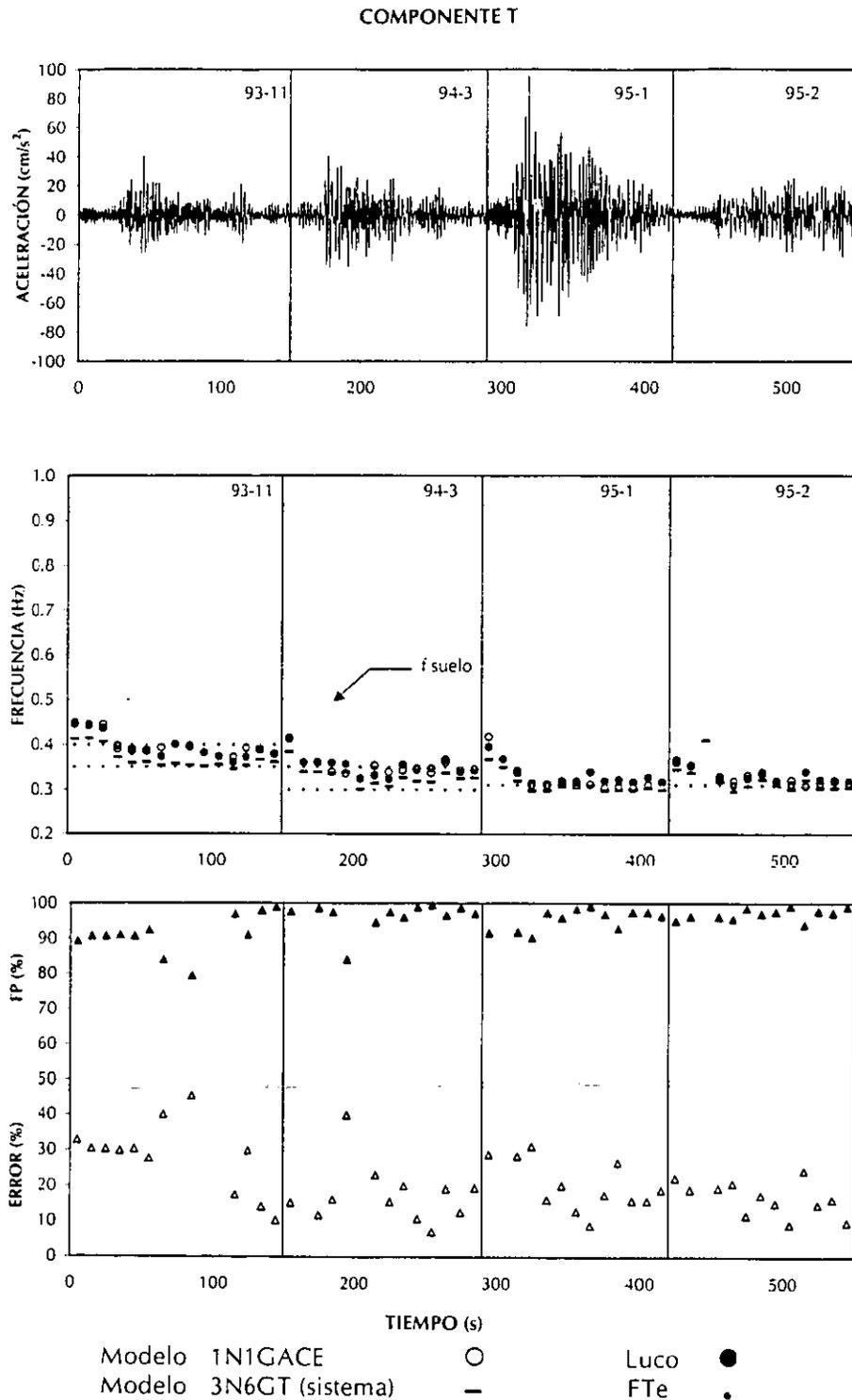


Fig 7.11. Frecuencias estimadas en el componente T para la estructura antes de la segunda rehabilitación

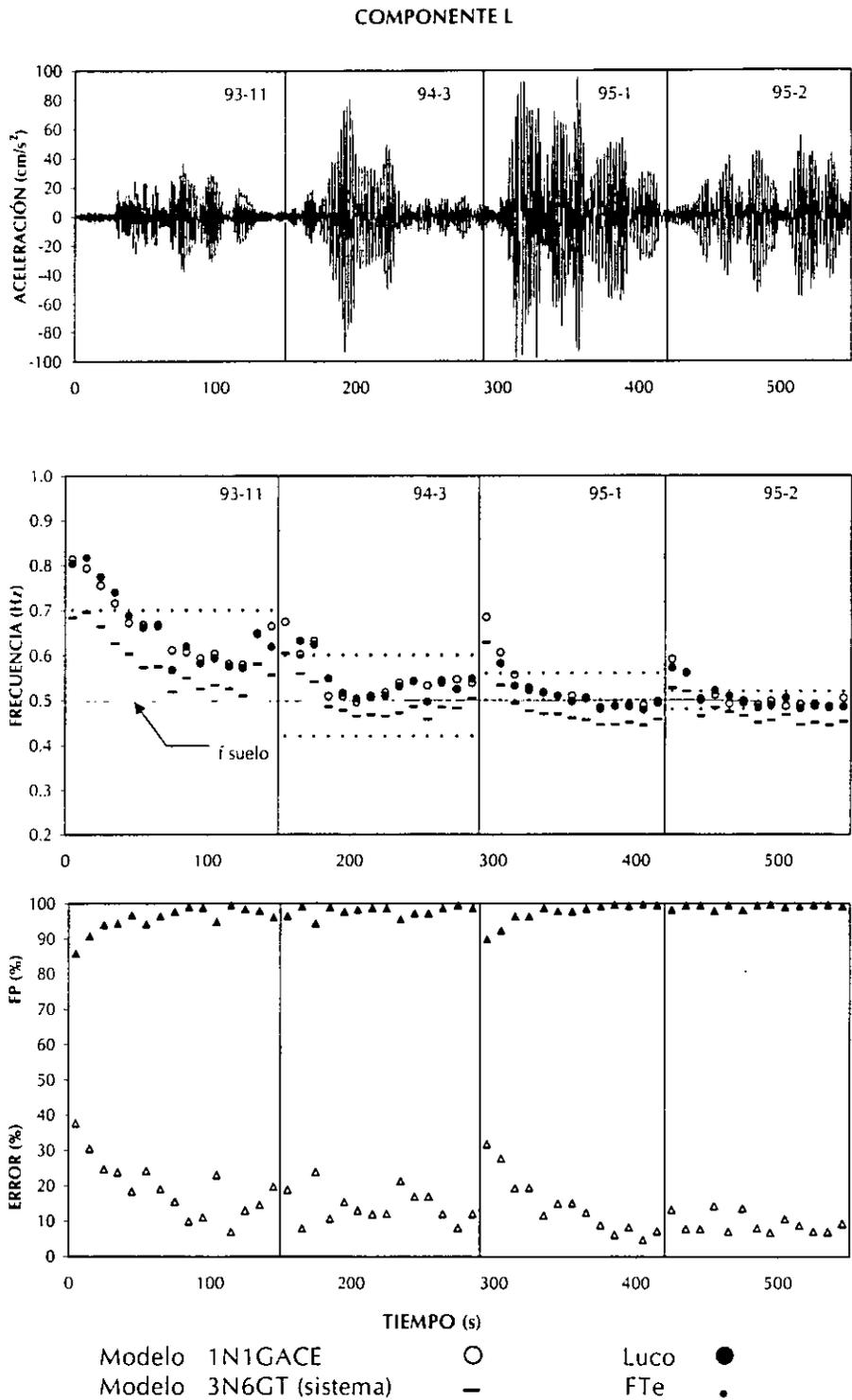


Fig 7.12. Frecuencias estimadas en el componente L para la estructura antes de la segunda rehabilitación

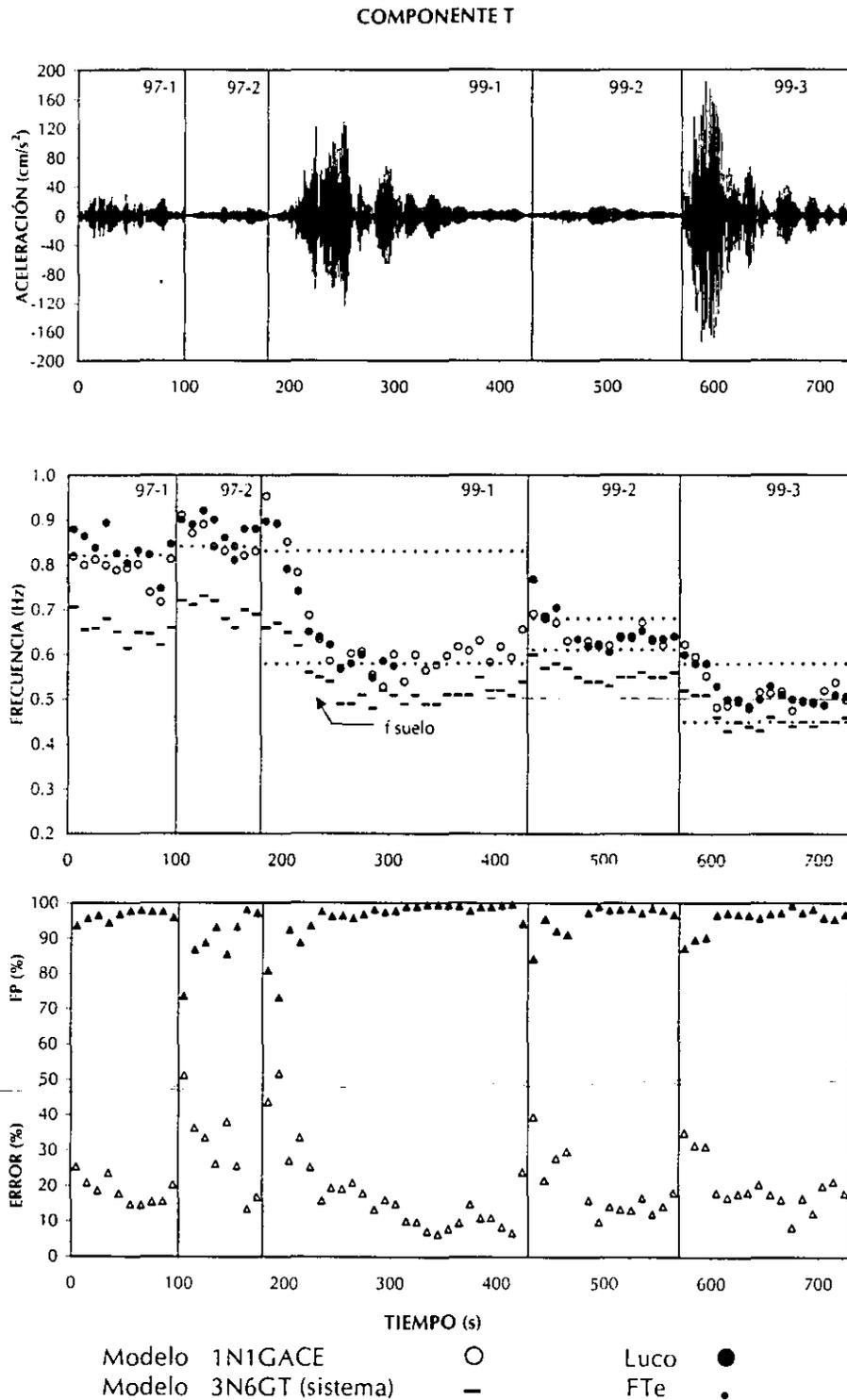


Fig 7.13. Frecuencias estimadas en el componente T para la estructura después de la segunda rehabilitación

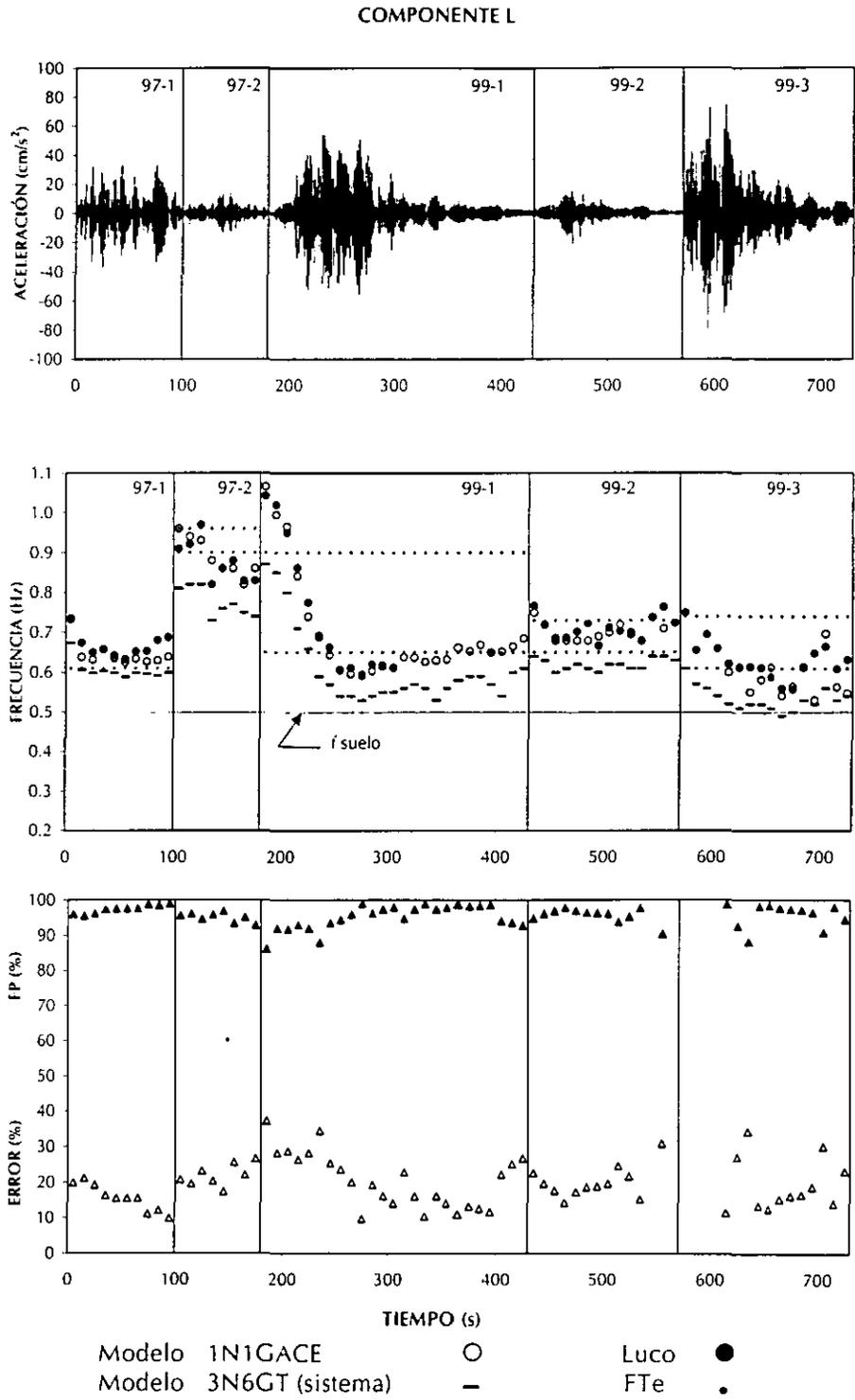


Fig 7.14. Frecuencias estimadas en el componente L para la estructura después de la segunda rehabilitación

7.2.2. Estimación de las frecuencias de cabeceo de la cimentación

Las frecuencias de cabeceo en los componentes T y L se determinaron mediante los modelos de un grado de libertad 1N1GSCC y 1N1GACC los cuales relacionan las señales asociadas con el cabeceo en el sótano y la azotea del edificio, respectivamente. Para este análisis se seleccionaron cinco de los diez eventos más representativos para el edificio: dos de ellos ocurridos antes de la segunda rehabilitación, el evento 93-11 en el cual la estructura no había sufrido todavía un daño visible y el evento 95-1 el más intenso, y tres ocurridos después de la rehabilitación, el evento 97-2 en el cual la estructura se comportó cuasi-linealmente y los eventos 99-1 y 99-3 los más intensos. Los anteriores eventos fueron seleccionados con el fin de tener una muestra representativa y conocer la influencia de los efectos ISE durante diferentes eventos y estados de la estructura.

En las figs 7.15 y 7.16 se presentan los parámetros estimados para el cabeceo en los dos componentes ortogonales de los eventos ocurridos antes de la segunda rehabilitación y en las figs 7.17 a 7.19 para los eventos ocurridos después de ésta. Estas figuras constan de 12 gráficas, las de la izquierda correspondientes al modelo 1N1GSCC y las de la derecha correspondientes al modelo 1N1GACC, tres de ellas para el componente T y tres para el componente L. Las primeras de cada componente representan las señales de respuesta relativa de aceleración de cabeceo medida en la base y en azotea, respectivamente, las segundas presentan las frecuencias de cabeceo identificadas con cada modelo y las últimas muestran los factores de participación totales (suma de participaciones de todas las frecuencias identificadas) y los errores totales en la identificación para el modelo de análisis. Se usó un tipo de gráfica en la cual el tamaño de cada punto (valor de frecuencia) está asociado con el porcentaje de participación de la misma en la respuesta de cabeceo de la base, lo cual será útil para el análisis de los resultados encontrados. La escala de tamaño de los círculos es gradual y varía entre cero y cien por ciento. En círculos vacíos aparece la frecuencia de cabeceo identificada para cada tramo con el modelo de Luco por ventanas, en este caso el tamaño no está asociado a una participación.

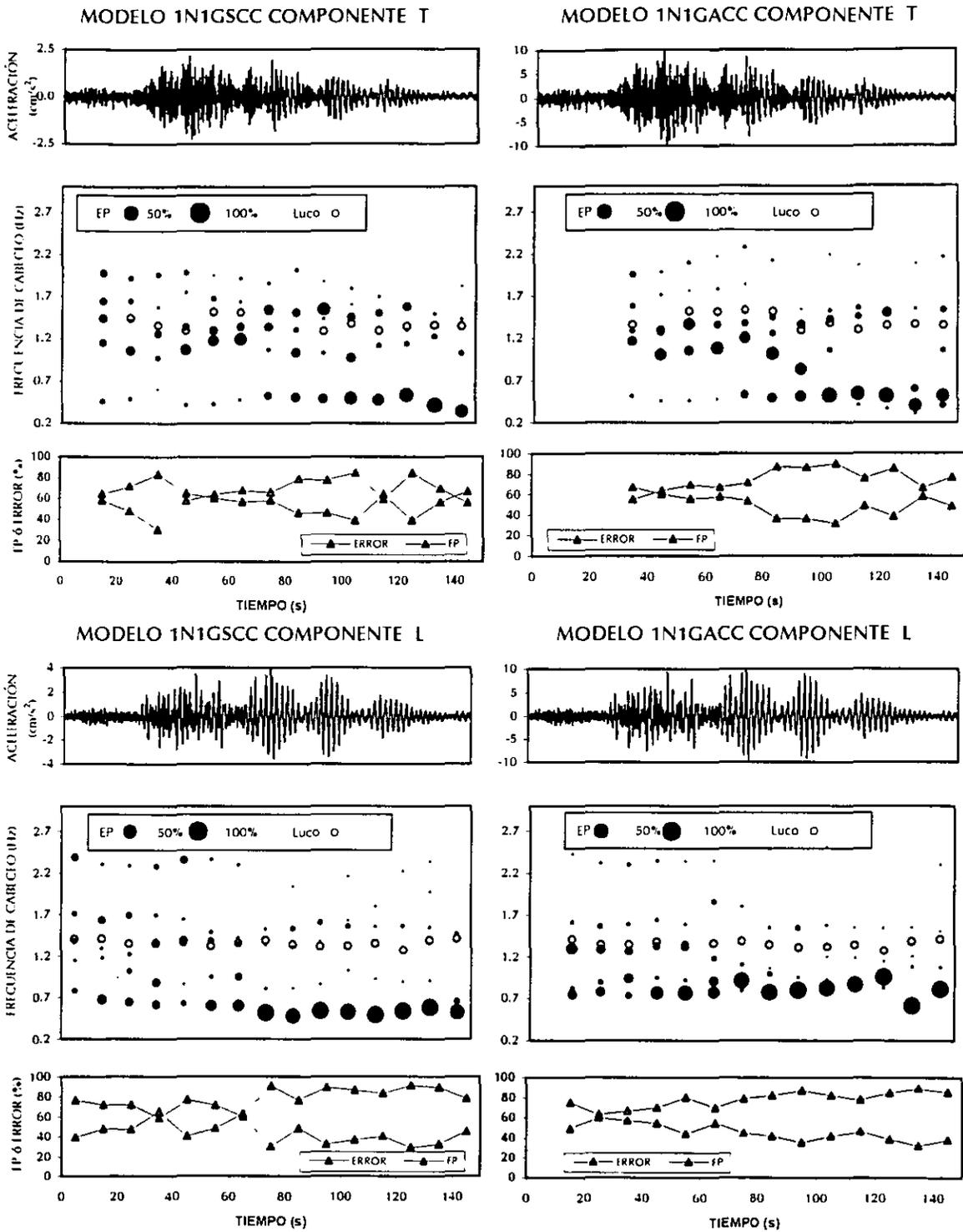


Fig 7.15. Frecuencias de cabeceo estimadas con los modelos 1N1GSCC y 1N1GACC del análisis EP y el modelo de Luco por ventanas, en los componentes T y L del evento 93-11 (la variación de los tamaños de punto correspondientes a EP es gradual y representa el porcentaje de participación en la respuesta de cada frecuencia. Se muestran en la leyenda los correspondientes al 50 y 100 por ciento.

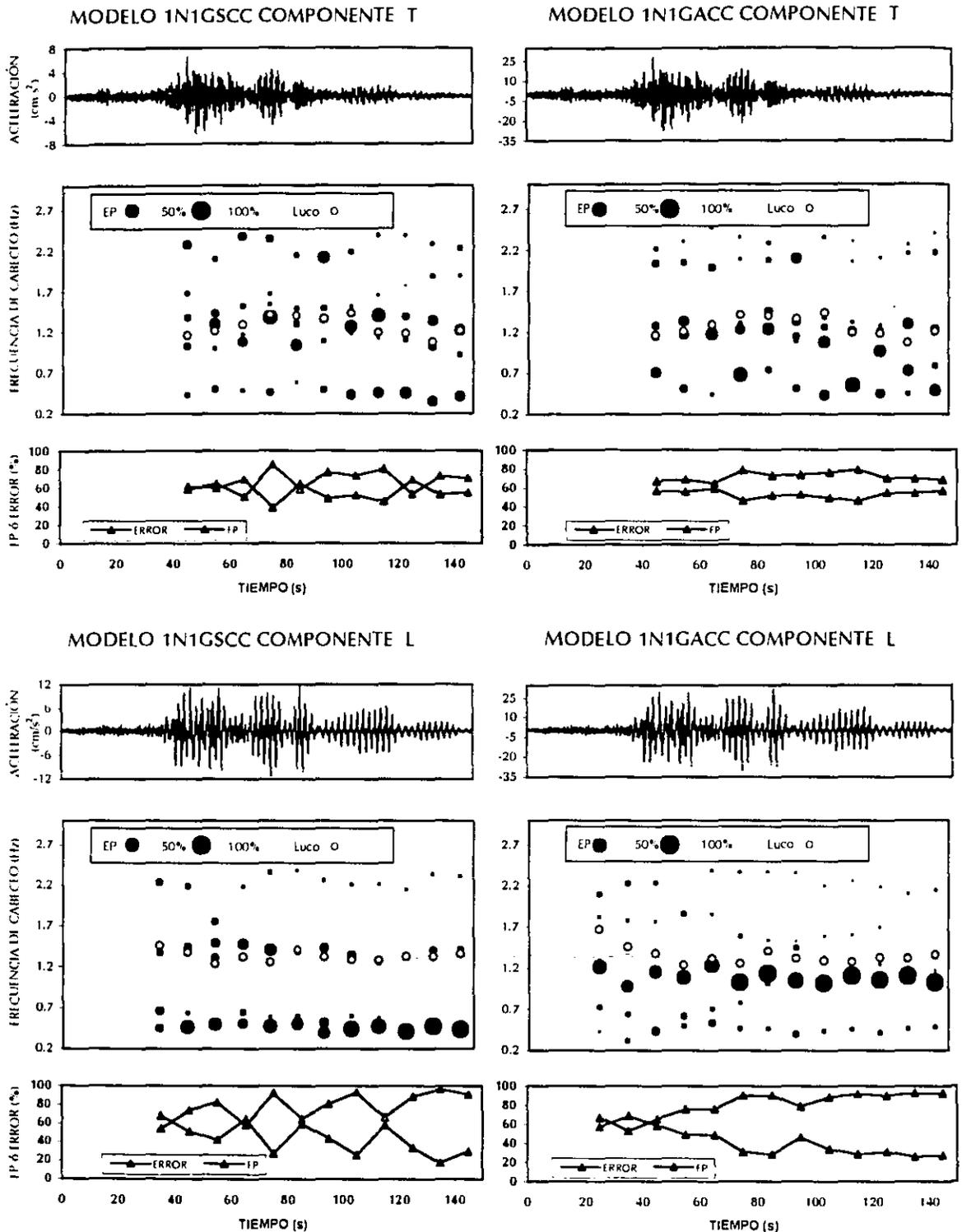


Fig 7.16. Frecuencias de cabeceo estimadas con los modelos 1N1GSCC y 1N1GACC del análisis EP y el modelo de Luco por ventanas, en los componentes T y L del evento 95-1 (la variación de los tamaños de punto correspondientes a EP es gradual y representa el porcentaje de participación en la respuesta de cada frecuencia. Se muestran en la leyenda los correspondientes al 50 y 100 por ciento.

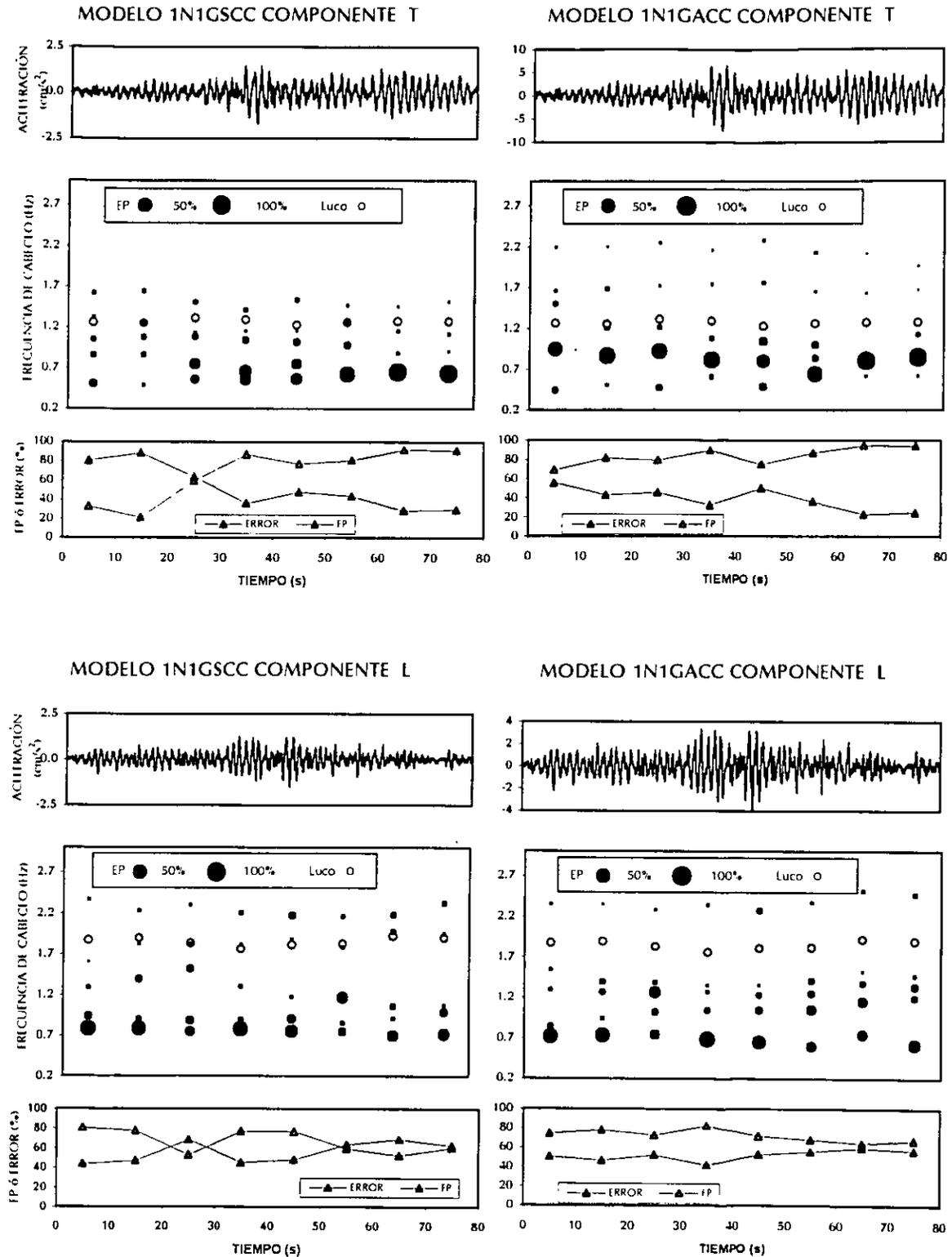


Fig 7.17. Frecuencias de cabeceo estimadas con los modelos 1N1GSCC y 1N1GACC del análisis EP y el modelo de Luco por ventanas, en los componentes T y L del evento 97-2 (la variación de los tamaños de punto correspondientes a EP es gradual y representa el porcentaje de participación en la respuesta de cada frecuencia. Se muestran en la leyenda los correspondientes al 50 y 100 por ciento.

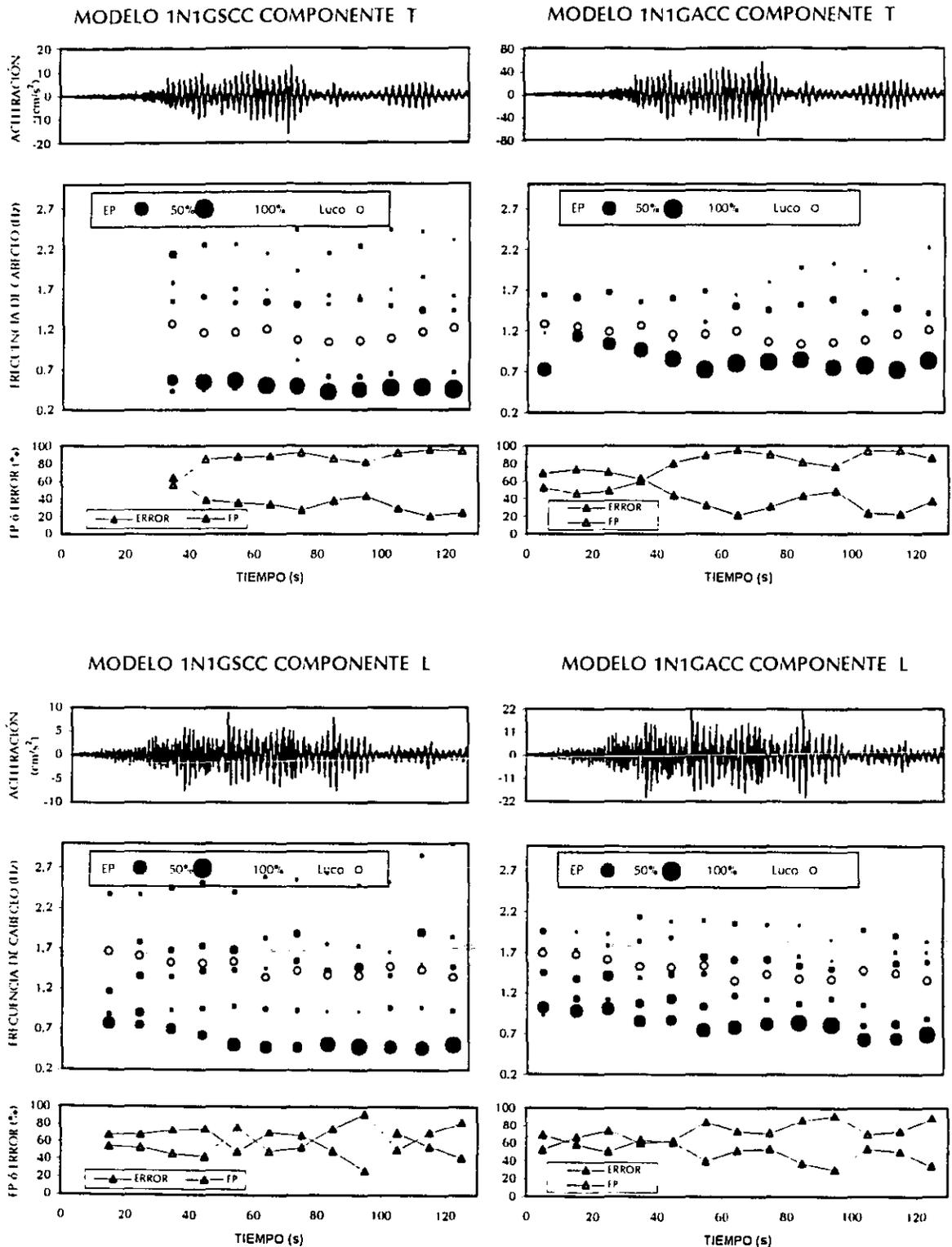


Fig 7.18. Frecuencias de cabeceo estimadas con los modelos 1N1GSCC y 1N1GACC del análisis EP y el modelo de Luco por ventanas, en los componentes T y L del evento 99-1 (la variación de los tamaños de punto correspondientes a EP es gradual y representa el porcentaje de participación en la respuesta de cada frecuencia. Se muestran en la leyenda los correspondientes al 50 y 100 por ciento).

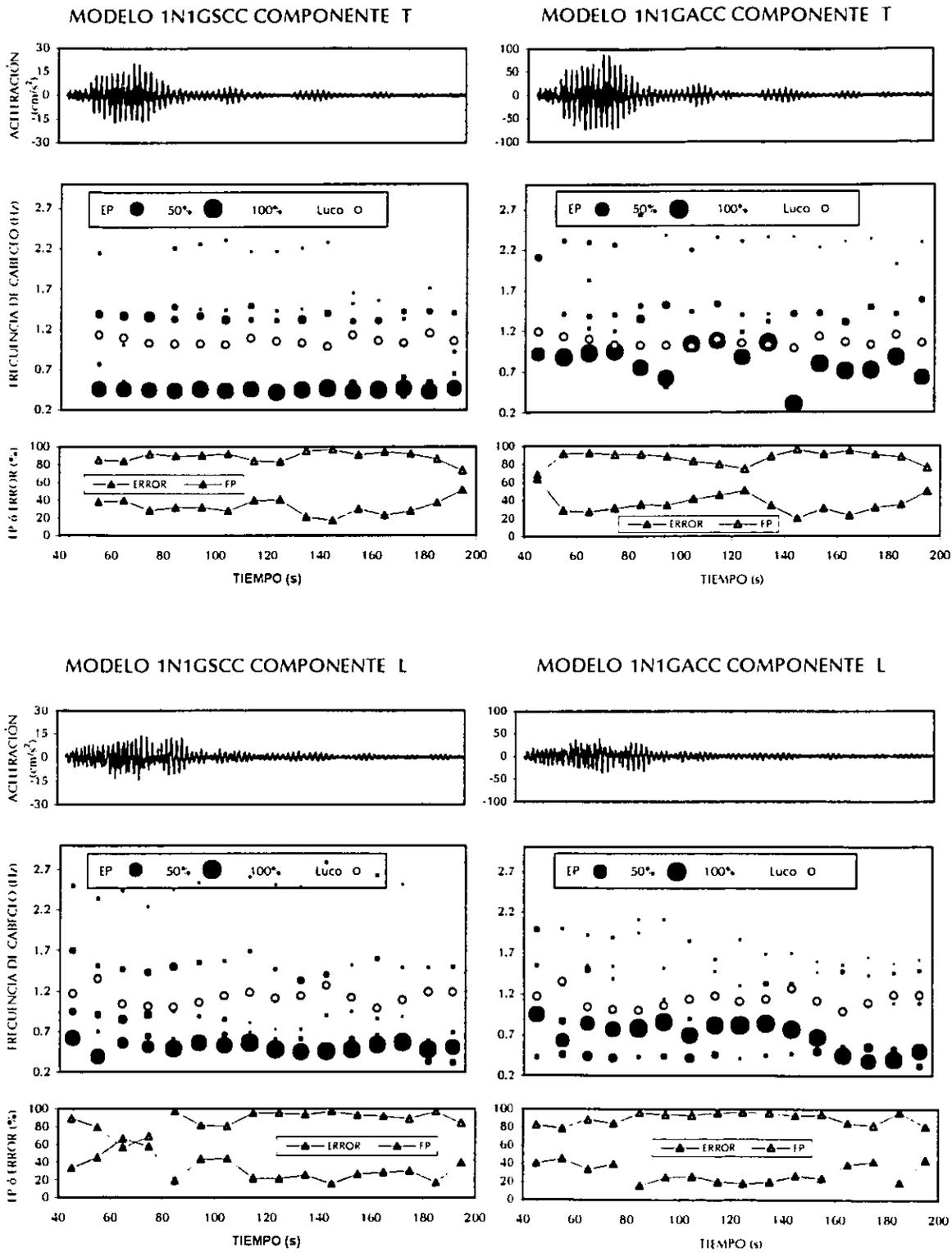


Fig 7.19. Frecuencias de cabeceo estimadas con los modelos 1N1GSCC y 1N1GACC del análisis EP y el modelo de Luco por ventanas, en los componentes T y L del evento 99-3 (la variación de los tamaños de punto correspondientes a EP es gradual y representa el porcentaje de participación en la respuesta de cada frecuencia. Se muestran en la leyenda los correspondientes al 50 y 100 por ciento).

Las tablas 7.9 y 7.10 muestran respectivamente el resumen de los índices de error y porcentajes de participación identificados con los modelos 1N1GSCC y 1N1GACC. Los valores identificados para todas las ventanas se presentan en el apéndice A.

En el apéndice B se explica lo que representan los índices de error y los porcentajes de participación, mediante las comparaciones entre las historias de aceleración de las respuestas experimentales (señales medidas), y las calculadas con los modelos 1N1GSCC y 1N1GACC en los componentes T y L para cada uno de los eventos analizados.

Tabla 7.9. Resumen de los índices de error estimados con los modelos 1N1GSCC y 1N1GACC

Evento	Modelo	ERRORES TOTALES (%)					
		T			L		
		min - máx	promedio	d e	min - máx	promedio	d e
93-11	1N1GSCC	39 - 84	58	15	29 - 77	52	18
	1N1GACC	31 - 67	49	11	33 - 60	46	9
95-1	1N1GSCC	39 - 69	56	10	18 - 68	44	16
	1N1GACC	46 - 59	53	4	26 - 69	41	14
97-2	1N1GSCC	29 - 89	52	23	44 - 69	56	11
	1N1GACC	23 - 56	39	12	42 - 60	52	6
99-1	1N1GSCC	20 - 64	35	12	28 - 75	60	15
	1N1GACC	21 - 74	45	19	30 - 69	50	12
99-3	1N1GSCC	17 - 51	32	9	16 - 66	33	15
	1N1GACC	20 - 64	36	11	16 - 46	30	10

d e - desviación estándar

Tabla 7.10. Resumen de la suma de los FP de todas las frecuencias estimadas con los modelos 1N1GSCC y 1N1GACC

Evento	Modo	PORCENTAJES DE PARTICIPACION (%)					
		T			L		
		FP _{min} - FP _{máx}	FP _{promedio}	FP _{d e}	FP _{min} - FP _{máx}	FP _{promedio}	FP _{d e}
93-11	1N1GSCC	30 - 85	65	15	39 - 92	69	20
	1N1GACC	55 - 90	75	11	64 - 89	78	8
95-1	1N1GSCC	50 - 85	67	11	54 - 97	78	14
	1N1GACC	65 - 79	72	5	53 - 93	81	13
97-2	1N1GSCC	21 - 92	68	27	53 - 81	67	12
	1N1GACC	69 - 95	84	23	65 - 82	73	6
99-1	1N1GSCC	56 - 96	86	11	44 - 92	62	16
	1N1GACC	46 - 96	77	18	52 - 91	73	12
99-3	1N1GSCC	74 - 97	89	6	56 - 97	87	11
	1N1GACC	68 - 96	86	8	79 - 97	90	7

d e - desviación estándar

En las figs 7.15 y 7.16 se presentan los eventos ocurridos antes de la segunda rehabilitación. Se observan errores altos en el ajuste superiores a 40 por ciento y más altos en el componente T que en el componente L. Se identificaron las frecuencias de cabeceo con porcentajes de participación variables con tendencia a crecer del comienzo al final del evento. Aquellas asociadas a un porcentaje de participación mayor parecieron estar relacionadas con las frecuencias propias de vibrar del sistema presentes principalmente al final de los eventos. Lo anterior fue más notorio en el componente L, tal vez por existir una mayor participación del cabeceo en los efectos ISE, como se vio en los análisis con el modelo de Luco. En el componente T y principalmente en el evento 95-1 las frecuencias encontradas no mostraron una tendencia clara con ninguno de los modelos analizados .

Después de la segunda rehabilitación, para el evento 97-2 (fig 7.17) se nota un cambio en las frecuencias de cabeceo identificadas. Se observa que las que presentaron mayor participación se aproximaron a la frecuencia fundamental del sistema. También se observa una relación con el contenido frecuencial de la señal, alcanzando mejores ajustes en tramos en donde las señales están bastante definidas. Se nota un mejor ajuste en el componente T con errores menores y un aumento en la suma de los FP.

En los eventos más intensos (evento 99-1 y evento 99-3) se presentaron los mejores ajustes para el modelo 1N1GSCC (figs 7.18 y 7.19). Se observaron errores inferiores a 40 por ciento y suma de factores de participación que alcanzaron valores de 97 por ciento. También se ve que en el tramo de señal cercano al final del evento, donde al parecer la estructura se encuentra en vibración libre y las señales están bastante definidas se presentan los menores errores.

Las frecuencias de cabeceo estimadas del 1N1GSCC con mayores porcentajes de participación fueron congruentes con las frecuencias propias del sistema. En el modelo 1N1GACC las frecuencias identificadas con mayor porcentaje de participación fueron superiores a la frecuencia del sistema, tal vez porque al trabajar con las señales de azotea se involucran efectos de acortamientos y alargamientos en las columnas durante sismos intensos en los cuales se presentan no linealidades que afectan las señales verticales e involucran frecuencias que no son las propias del sistema.

Comentarios

De los anteriores análisis para la identificación de las frecuencias de cabeceo con el análisis EP se pueden hacer las siguientes observaciones generales:

- En cada ventana se identificaron varias frecuencias, definiendo intervalos de acuerdo a las tendencias observadas y porcentajes de participación obtenidos. Estos intervalos mostraron congruencia con los obtenidos en los análisis con cocientes espectrales del componente vertical.
- En los eventos ocurridos antes de la rehabilitación, las mayores participaciones estuvieron asociadas al componente L y las menores al T. En los eventos después de la segunda rehabilitación, las participaciones asociadas a los dos componentes fueron similares y en algunos casos mayores en el componente T que en L.
- En los modelos analizados existe una relación directa entre los factores de participación y los errores totales. Para las ventanas en las que el porcentaje de participación es grande se tienen errores más bajos.
- En general, las mayores participaciones estuvieron asociadas con el modelo que relaciona las señales en azotea (1N1GACC) y con las frecuencias identificadas cercanas a la frecuencia fundamental del sistema y de la estructura.
- Cuando se trabaja con las señales en el sótano se presentan problemas debido al ruido en las mismas, originado por la interacción del movimiento del suelo y la cimentación.
- El proceso de identificación presentó dificultades en las fases iniciales de los eventos en las cuales hubo problemas de ajuste debido a presencia de ruido en las señales que pierde importancia en ventanas posteriores y favorece la identificación. Finalmente, en el tramo final de cada evento (vibración libre de la estructura), las respuestas coincidieron aproximadamente y se presentaron los menores errores con las más altas participaciones de las frecuencias de cabeceo con valores cercanos a la frecuencia fundamental del sistema.

7.3. Comparación entre las técnicas de identificación

En las figs 7.11 a 7.14 se presentaron las frecuencias de la estructura obtenidas mediante los cocientes FTe, el modelo de Luco por ventanas y el modelo 1N1GACE comparados con la frecuencia fundamental obtenida en los análisis paramétricos del sistema \bar{f}_1 . Las menores frecuencias de la estructura estimadas con las diferentes técnicas y la del sistema, se muestran en la tabla 7.11 . Se observa que hay una buena correlación en las respuestas encontradas con las cuatro técnicas.

Cuando se tiene comportamiento no lineal, como en el caso de los eventos 94-3, 99-1 y 99-3 se encuentran mejores resultados con el análisis del modelo 1N1GACE, ya que se pueden conocer las variaciones de los parámetros durante el evento. En el caso del análisis espectral de la señal completa (modelo de Luco y cocientes FTe) no se identifican bien estas variaciones y se presentan las mayores diferencias.

En general, las frecuencias obtenidas mediante el modelo 1N1GACE y el modelo de Luco por ventanas muestran buena congruencia entre ellas, siendo prácticamente similares, salvo el caso de algunas ventanas en las cuales difieren por limitaciones particulares de los métodos de identificación.

Se observa que para los eventos ocurridos antes de la rehabilitación, las frecuencias de la estructura encontradas con las cuatro técnicas, son en todos los casos, mayores que las estimadas para el sistema, evidencia de los efectos ISE.

En las figs 7.15 a 7.19 se comparan las frecuencias de cabeceo obtenidas mediante el método de Luco y el análisis EP con los modelos 1N1GSCC y 1N1GACC. Los valores asociados a estas figuras comparados con las frecuencias encontradas con los cocientes espectrales SO/SC , SE/SC , AO/AC y AE/AC se presentan en las tablas 7.12 y 7.13 para los componentes T y L, respectivamente. Se destaca que estos cocientes espectrales no hacen posible determinar a que componente de análisis están asociadas las frecuencias identificadas, razón por la cual se presentan los mismos intervalos para los dos componentes.

Tabla 7.11. Frecuencias (Hz) de la estructura en los componentes T y L obtenidas mediante las cuatro técnicas de identificación analizadas

Evento	F _{Te}		Luco		Luco por ventanas		1N1GACE		Sistema	
	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L
93-3	0.43	0.76	0.39	0.75	-	-	-	-	0.37	0.65
93-4	0.38-0.43	0.70-0.76	0.37	0.70	-	-	-	-	0.35	0.61
93-11	0.35-0.40	0.7	0.37	0.65	0.36	0.57	0.35	0.58	0.35	0.57
94-1	0.4	0.7	0.39	0.65	-	-	-	-	0.37	0.58
94-3	0.30-0.35	0.42-0.60	0.30	0.49	0.32	0.50	0.34	0.50	0.29	0.45
95-1	0.31	0.50-0.56	0.29	0.49	0.31	0.48	0.30	0.48	0.28	0.45
95-2	0.31	0.48-0.52	0.30	0.49	0.31	0.48	0.31	0.49	0.29	0.45
96-1	0.33-0.36	0.52-0.64	0.37	0.51	-	-	-	-	0.34	0.48
97-1	0.82	0.61	0.73	0.61	0.75	0.63	0.72	0.62	0.60	0.56
97-2	0.84	0.90-0.96	0.79	0.85	0.81	0.82	0.82	0.82	0.64	0.74
98-1	0.87	0.88-1.20	0.78	0.86	-	-	-	-	0.63	0.74
99-1	0.65-0.73	0.73-0.82	0.63	0.58	0.55	0.59	0.59	0.59	0.54	0.52
99-2	0.61-0.68	0.65-0.73	0.63	0.67	0.61	0.67	0.62	0.68	0.54	0.59
99-3	0.45-0.58	0.61-0.74	0.51	0.59	0.48	0.56	0.47	0.53	0.46	0.52

Se puede observar que para los dos componentes, los intervalos de frecuencia identificados con los cocientes espectrales y el análisis EP coinciden aproximadamente, con la ventaja de que en este último, se pueden conocer las participaciones asociadas a las frecuencias identificadas, a la vez que se identifican las asociadas a cada componente de análisis por separado.

Las frecuencias de cabeceo identificadas con el modelo simplificado de Luco, caen en un intervalo que coincide aproximadamente con el tercer intervalo de frecuencias identificadas con los cocientes espectrales y EP, el cual parece estar asociado con la frecuencia propia del cabeceo de la cimentación.

Se destaca que el primer intervalo de frecuencias identificado puede ser el más importante, ya que de los análisis paramétricos se vio que estas frecuencias estuvieron asociadas a las mayores participaciones y cercanas a la frecuencia fundamental de traslación de la estructura o del sistema para los componentes T y L.

Tabla 7.12. Frecuencias (Hz) de cabeceo en el componente T obtenidas con los cocientes SO/SC, SE/SC, AO/AC y AE/AC, con el modelo de Luco y con el análisis EP

Evento	Nivel	Intervalos de frecuencias				
		1	2	3	4	5
93-11	Azotea	0.49-0.64	0.98			2.30-2.60
	Sótano	0.49-0.62				2.15-2.35
	1N1GACC	0.30-0.60	0.83-1.20	1.25-1.83	1.95-2.28	
	1N1GSCC	0.34-0.60	0.98-1.23	1.30-1.75	1.75-2.01	
	Luco	1.29-1.53				
95-1	Azotea	0.42-0.64	0.90-0.95	1.40-1.50	1.84-1.86	
	Sótano	0.42-0.52	0.90-0.95	1.35-1.50		2.10-2.35
	1N1GACC	0.43-0.79	0.97-1.45			1.99-2.48
	1N1GSCC	0.43-0.58	0.92-1.19	1.21-1.68	1.88-2.39	
	Luco	1.07-1.43				
97-2	Azotea	0.50-0.78	1.01	1.30-1.32		
	Sótano	0.49-0.76		1.30-1.32		2.15-2.35
	1N1GACC	0.44-0.62	0.65-0.95	1.00-1.25	1.50-1.76	2.12-2.28
	1N1GSCC	0.50-0.75	0.86-1.16	1.25-1.64		
	Luco	1.23-1.31				
99-1	Azotea	0.43-0.65	1.05	1.40-1.48	1.73	
	Sótano	0.43-0.76	0.93	1.32-1.48	1.70	2.06-2.28
	1N1GACC		0.73-1.14	1.40-1.68		1.75-2.22
	1N1GSCC	0.42-0.66	0.81	1.15	1.42-1.84	1.92-2.43
	Luco	1.03-1.28				
99-3	Azotea	0.42-0.72	0.91-0.97	1.30-1.40	1.80-1.93	
	Sótano	0.40-0.67	0.91-0.95	1.27-1.53	1.81-1.93	2.21-2.41
	1N1GACC	0.30	0.52-1.08	1.19-1.58	1.83	2.02-2.63
	1N1GSCC	0.42-0.65		1.30-1.71		2.15-2.31
	Luco	0.99-1.19				

Tabla 7.13. Frecuencias (Hz) de cabeceo en el componente L obtenidas con los cocientes SO/SC, SE/SC, AO/AC y AE/AC, con el modelo de Luco y con el análisis EP

Evento	Nivel	Intervalos de frecuencias				
		1	2	3	4	5
93-11	Azotea	0.49-0.64	0.98			2.30-2.60
	Sótano	0.49-0.62				2.15-2.35
	1N1GACC	0.61-0.99	1.06-1.30	1.51-1.86		2.30-2.51
	1N1GSCC	0.52-0.77	0.80-1.14	1.22-1.80		1.97-2.39
	Luco	1.27-1.40				
95-1	Azotea	0.42-0.64	0.90-0.95	1.40-1.50	1.84-1.86	
	Sótano	0.42-0.52	0.90-0.95	1.35-1.50		2.10-2.35
	1N1GACC	0.32-0.78	0.98-1.29	1.45-1.86		2.10-2.39
	1N1GSCC	0.40-0.66	1.28-1.49	1.75		2.15-2.38
	Luco	1.26-1.67				
97-2	Azotea	0.50-0.78	1.01	1.30-1.32		
	Sótano	0.49-0.76		1.30-1.32		2.15-2.35
	1N1GACC	0.60-0.84	0.94-1.20	1.24-1.54		2.27-2.51
	1N1GSCC	0.70-0.91	0.99-1.52	1.60-1.92		2.16-2.37
	Luco	1.76-1.92				
99-1	Azotea	0.43-0.65	1.05	1.40-1.48	1.73	
	Sótano	0.43-0.76	0.93	1.32-1.48	1.70	2.06-2.28
	1N1GACC	0.63-0.98	1.04-1.17	1.37-1.73	1.78-2.14	
	1N1GSCC	0.47-0.78	0.89-0.99	1.17-1.55	1.67-1.91	2.37-2.99
	Luco	1.35-1.69				
99-3	Azotea	0.42-0.72	0.91-0.97	1.30-1.40	1.80-1.93	
	Sótano	0.40-0.67	0.91-0.95	1.27-1.53	1.81-1.93	2.21-2.41
	1N1GACC	0.32-0.44			1.87-1.99	
	1N1GSCC	0.32-0.70	0.85-0.95	1.33-1.70		2.24-2.74
	Luco	1.00-1.35				

8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron 14 de los eventos más importantes que ha soportado el edificio Jal desde su instrumentación, ocho de ellos ocurridos antes de haber sido rehabilitado y seis ocurridos después de la segunda rehabilitación.

Se evaluaron diferentes técnicas de identificación de sistemas paramétricas y no paramétricas, en el dominio del tiempo y la frecuencia. Éstas permitieron hacer análisis completos y por tramos de los registros de dos sismos, uno de pequeña (97-2) y uno de moderada intensidad (99-1), con el fin de identificar las propiedades dinámicas del sistema.

Las técnicas de identificación basadas en cocientes espectrales son rápidas y permiten determinar las frecuencias de un sistema; siempre y cuando se procesen con una adecuada resolución en frecuencia (se tendrá más certeza en los resultados mientras mayor sea la longitud de los registros). En cambio, hay dificultades para el cálculo de los amortiguamientos modales, ya que este parámetro es muy sensible a la calidad de las señales registradas, tanto en frecuencia como en amplitud, así como al factor de suavizado que se emplee en el análisis. Estas técnicas, a su vez, presentaron limitaciones relacionadas con el comportamiento no lineal, ya que no permiten definir adecuadamente cambios en las propiedades dinámicas durante un evento; en estos casos resulta más adecuada la técnica paramétrica modal.

Con el ajuste de modelos de un grado de libertad (FTcal) se obtuvieron iguales resultados que con los cocientes experimentales (FTexp) para los eventos analizados, sin embargo, la ventaja de FTcal este método sobre FTexp está en el cálculo del amortiguamiento, se pueden obtener mejores resultados. Ahora bien, cuando los datos tienen pobre resolución, o hay efectos no lineales estas alternativas no son adecuadas.

De la evaluación de las técnicas de identificación se seleccionaron el análisis espectral (FTexp) y la técnica paramétrica modal (EP), las que resultaron más apropiadas para identificar las propiedades del sistema y sus variaciones durante un mismo evento y de un evento a otro.

Se destaca que el contenido de energía de las señales analizadas está concentrado entre 0.2 y 2 Hz, siendo 0.5 Hz la frecuencia dominante del suelo. Fue fácil identificar las frecuencias propias del sistema en este intervalo. Las frecuencias de modos superiores y de torsión presentaron limitaciones en la identificación por no haber suficiente contenido de energía en estas frecuencias.

Con los cocientes espectrales se identificaron las frecuencias naturales de vibrar y los porcentajes de amortiguamientos críticos modales. De este análisis, se tuvo evidencia de una respuesta no lineal del edificio en algunos eventos, en los cuales no se presentaba un máximo espectral bien definido sino un intervalo de valores.

Debido a que varios de los registros estudiados revelaron una respuesta no lineal del edificio, se analizaron las señales por tramos con la técnica paramétrica y se pudo conocer la variación de los parámetros dinámicos: las frecuencias naturales de vibrar, porcentajes de amortiguamientos críticos modales, formas modales, errores relativos de cada respuesta calculada con respecto a la experimental, errores totales del proceso de identificación y factores de participación de cada modo en la respuesta. Para ello se usaron modelos que consideraron una y varias respuestas en el edificio, con excitaciones en el sótano y en el terreno.

En el análisis paramétrico hecho por Toro Jaramillo (1997), se concluyó que al usar modelos con excitaciones en el sótano se obtenían prácticamente las mismas frecuencias del sistema con menores índices de error que con los modelos de excitación en el terreno. Sin embargo, para los eventos ocurridos después de la segunda rehabilitación se comprobó que existían diferencias en las frecuencias identificadas del sistema, debido al aumento en los efectos ISE. Por esta razón se adoptaron los modelos con excitaciones en el terreno, para la identificación de las propiedades dinámicas del sistema, en todos los eventos ocurridos después de la segunda rehabilitación.

Se observó que durante los eventos menos intensos, la variación de la frecuencia es poca. Se encontró un incremento en la rigidez del edificio con la segunda rehabilitación. Sin embargo, durante los eventos más intensos ocurridos en el año 1999 (99-1 y 99-3), hubo una pérdida de rigidez de la estructura asociada con deterioro y comportamiento no lineal,

alcanzando frecuencias cercanas a la frecuencia dominante del suelo. Se presentaron grandes amplificaciones en los movimientos de la azotea por una casi entrada en resonancia del sistema. Se observó también, una aparente recuperación en la frecuencia después de ocurrido un sismo, aspecto que debería tenerse en cuenta en los modelos de daño en edificios, que suponen una degradación de rigidez que se acumula sucesivamente sin considerar alguna recuperación.

Los amortiguamientos mostraron cierta tendencia: fueron mayores en el componente L que en T y torsión, y mayores para los primeros modos de vibrar. Esto se explica porque en el componente L se encuentran los muros de mampostería y los elementos de concreto, en los cuales se activan planos de falla de grietas antiguas que permanecían cerradas antes de iniciarse el temblor y aparecen grietas nuevas. En este proceso que depende de la fricción existente entre las caras de la grieta, las irregularidades del plano de falla y las fluctuaciones en la amplitud del movimiento, crece el amortiguamiento asociado a este componente con relación al componente T, en el cual se encuentran las diagonales de acero que permanecen elásticas durante el sismo y que tienen de por sí menores amortiguamientos.

Se notó una relación de los amortiguamientos con la amplitud de la señal y con comportamiento no lineal. En los eventos más intensos y en los tramos de mayor amplitud fueron superiores. Se tuvieron dificultades para su estimación en algunas ventanas, principalmente en el componente de torsión. En estos casos, para facilitar la convergencia, se tomaron valores entre 1 y 3 por ciento y se comprobó que si se usaba un valor promedio de 2.5 por ciento las frecuencias identificadas no eran sensibles a este parámetro.

Las frecuencias y amortiguamientos identificados con los modelos que consideran sólo una respuesta de traslación en L y la respuesta de traslación en T y torsión, fueron similares a las identificadas con los modelos que consideran tres y seis respuestas para los componentes L y T, respectivamente. Aquellos modelos reproducen muy bien el comportamiento del edificio, incluso lográndose identificar modos superiores (segundo modo). Por lo tanto, ésto puede ser de gran utilidad para analizar registros con esta técnica de identificación de sistemas, en edificios donde sólo se cuenta con instrumentos en la azotea y el terreno.

En todos los eventos analizados se observó que los dos primeros modos reproducen muy bien la respuesta con porcentajes mayores a 95 por ciento en todos los niveles en los componentes T y L, existiendo una participación importante del primer modo, con contribuciones superiores al 90 por ciento. Las mayores participaciones se obtuvieron en las fases intensas de los eventos. En torsión se tuvieron bajas contribuciones, asociadas con una calidad deficiente de las señales y pequeñas amplitudes de las mismas para estas frecuencias que se encuentran alejadas de la frecuencia dominante del sitio. Las implicaciones para el diseño que se derivan de la observación, de que el primer modo de vibrar domina la respuesta estructural son: la aplicación válida del método estático, y de los métodos de superposición modal, haciendo uso de pocos modos en el análisis.

En cuanto a los índices de error en la estimación, estuvieron relacionados con las contribuciones de los modos estimados, así como de la calidad y contenido de la señal. En este trabajo se encontraron índices de error similares a los obtenidos en análisis aplicando esta técnica de identificación (Li y Mau, 1991; Durrani et al, 1994). Los errores menores estuvieron asociados con un factor de contribución alto en la respuesta del primer modo y con una mayor amplitud en la señal.

Las frecuencias estimadas con FTexp resultaron similares a las obtenidas con EP, pero los amortiguamientos obtenidos fueron menores, principalmente en el componente L. Sin embargo, coincidieron aproximadamente con un valor promedio del estimado con EP. La ventaja de EP sobre FTexp es que permite identificar variaciones de este parámetro durante un sismo y además resulta ser un método más preciso para el cálculo de este valor. Los valores de amortiguamiento estimados coincidieron con los valores que se suponen comúnmente en la práctica del análisis y el diseño de edificios de concreto.

Existe evidencia de los efectos no lineales que se manifiestan en las reducciones sucesivas en las frecuencias de vibración del edificio, como consecuencia de los sismos de baja y moderada intensidad a los que ha estado sometido. Estas reducciones fueron consistentes con los algunos de los daños observados en la edificación. Sin embargo en el evento 99-3, Inicialmente se creyó que la separación visible entre los elementos de acero y las interfaces concreto-concreto, era sólo un fisuramiento en la junta fría. Con los análisis de modelos analíticos de la respuesta estructural y de identificación llevada a cabo en este trabajo, se

confirmó que ésto era evidencia de un deslizamiento en las interfaces, porque existió una pérdida de rigidez asociada al mismo.

En algunos casos las reducciones en frecuencia encontradas son importantes, lo cual tiene repercusiones en el diseño, debido a que para la estimación de los desplazamientos en el estado límite de servicio, se supone que la estructura permanece elástica y tiene por lo tanto un período fijo. Sin embargo, se ve que para sismos moderados, tal vez inferiores al sismo de servicio se presentan cambios en el período, pudiéndose estar errando en el cálculo de los desplazamientos, según la zona del espectro en la cual se encuentra la estructura. Esta observación no puede generalizarse pero debería tenerse en cuenta.

El análisis no paramétrico de los efectos ISE mostró la sensibilidad de éstos con la intensidad del movimiento, las variaciones en las características estructurales por deterioro y por los trabajos de rehabilitación, los que fueron más evidentes en el componente T.

Los cocientes espectrales efectuados con los registros verticales de las esquinas del sótano y la azotea, dan una idea de las frecuencias de cabeceo del sistema, pero presentan el inconveniente de que no permiten diferenciar el componente al cual están asociadas estas frecuencias.

La participación de la traslación de la base en la respuesta de la estructura fue baja en todos los eventos, e inferior al 6 por ciento, razón por la cual, se nota que los efectos ISE por contribución de ésta no fueron significativos.

Antes de la rehabilitación las contribuciones por cabeceo variaron de 6 a 9 por ciento en T y de 11 a 21 por ciento en L. Lo cual indica que los movimientos en la base debido a los efectos ISE contribuyeron en menor proporción en la respuesta del edificio en el componente T. Después de la segunda rehabilitación las contribuciones fueron más significativas en T y se mantuvieron en L, variando entre 17 y 29 por ciento y entre 12 y 21 por ciento, para los componentes T y L, respectivamente.

Con la técnica paramétrica modal utilizada, fue posible estimar con los modelos propuestos, las frecuencias de la estructura con base rígida y las asociadas con movimientos de cabeceo

de la base permitiendo evaluar las propiedades dinámicas de un sistema con efectos ISE importantes.

En las frecuencias asociadas al cabeceo de la cimentación, se presentaron dificultades relacionadas con la sensibilidad de los efectos ISE con la intensidad del movimiento, las variaciones en las características estructurales y los efectos de contacto entre la cimentación y el suelo. Se observó que el movimiento del suelo incorpora ruido a los registros de la base, dificultando la identificación de las frecuencias de cabeceo en el comienzo y la fase intensa de los eventos. Cuando la estructura está prácticamente en vibración libre, se identificó un amplio grupo de frecuencias con porcentajes de participación totales cercanos al 90 por ciento, principalmente en aquellos eventos ocurridos después de la segunda rehabilitación y más notorios en el componente T.

Al usar las señales verticales en la azotea se elimina el problema del ruido en la base, pero se involucran efectos de acortamiento y alargamiento en las columnas durante sismos intensos en los cuales la respuesta es no lineal, que afectan las señales verticales e involucran frecuencias que no son las propias del sistema. Por lo anterior, sería útil instrumentar con sensores verticales un piso más arriba de la base, así se aislarían los problemas mencionados y tal vez mejoraría el ajuste de las frecuencias identificadas de cabeceo por interacción.

En los modelos paramétricos analizados existe una relación directa entre los factores de participación y los errores totales en la identificación. Para las ventanas en las que el porcentaje de participación es grande se tienen errores más bajos. Las participaciones mayores estuvieron relacionadas con frecuencias cercanas a la frecuencia fundamental del sistema y de la estructura.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el método paramétrico modal resulta ser útil cuando se quiere identificar las propiedades del sistema y la estructura. Cuando se quieren estimar las propiedades relacionadas con la traslación y cabeceo de la base existen limitaciones debido a la calidad y contenido frecuencial de estas señales, cuando los efectos ISE no son muy significativos. En eventos intensos y cuando los efectos ISE debidos al cabeceo de la base fueron importantes, se encontraron mejores resultados que con los análisis no paramétricos, ya que no sólo, presenta la ventaja de identificar las frecuencias de

cabeceo de cada componente horizontal independientemente, y a su vez las participaciones asociadas a estas frecuencias, sino también permite encontrar diferentes intervalos de frecuencias de cabeceo, entre ellas las presentan una mayor contribución y son cercanas a la frecuencia dominante del sistema, que con el método simplificado de Luco no se reproducen, y por el contrario se encuentran frecuencias que al ser comparadas con la identificación paramétrica se observa, tuvieron una menor participación en dicha respuesta.

Sería útil usar métodos no lineales para el diseño de los reforzamientos de una estructura rehabilitada. Como se vio en este trabajo, pueden presentarse no linealidades y reducciones de rigidez importantes en edificios reparados, que podrían prevenirse si se toman en cuenta consideraciones de comportamiento no lineal (ya sea de los materiales o no linealidad estructural) en el diseño de estos elementos.

Las conclusiones derivadas de este trabajo podrían incorporarse a la práctica de la ingeniería:

- Para el cálculo de los períodos de diseño: dadas ciertas características estructurales, a través de la recopilación de información de mediciones en diferentes edificios y tratando de establecer expresiones o reglas empíricas, que tengan en cuenta las variaciones que puede sufrir el período estructural durante sismos aún de pequeña intensidad; con el fin de determinar valores límite que debe cumplir este parámetro calculado, según las características estructurales.
- Para la reglamentación sísmica relacionada con la instrumentación de edificios principalmente en zonas de amenaza sísmica alta y para estructuras que se consideren importantes, con el fin de llevar un seguimiento del comportamiento de las mismas.

A la luz de los resultados obtenidos, convendría hacer investigaciones con modelos no lineales de comportamiento y tratar de incorporarlos a la práctica del diseño de reforzamientos y reparación de edificios. A su vez, analizar los registros de edificios ya instrumentados que aún no se analizan, e instrumentar edificios de cierta importancia que no hayan sido dañados o que estén en proyecto, con el fin de establecer una especie de base de datos de comportamiento estructural que permita extender las conclusiones particulares obtenidas en este trabajo y obtener unas más generales que abarquen una amplia gama de edificios.

9. RECONOCIMIENTOS

Se reconoce a la Secretaría de Obras Públicas del Departamento del Distrito Federal y del Gobierno del Distrito Federal. A los propietarios del edificio por las facilidades otorgadas para la operación y mantenimiento de los instrumentos. Se destaca la eficiente labor desempeñada por el grupo de instrumentación encargado de la operación y mantenimiento de la red acelerográfica del edificio Jal: Leonardo Alcántara, David Almora Mata, Gerardo Castro Parra, Roberto Quaas Weppen, Miguel Torres Noguéz, Juan Manuel Velasco y Jesús Ylizaliturri.

Se agradece a Gerardo Rodríguez Gutiérrez por su colaboración en el procesamiento de las señales usadas en este trabajo.

Se agradece a Jorge Humberto Pérez y Ana María Toro Jaramillo los valiosos aportes con sus análisis previos de las propiedades dinámicas del edificio Jal aplicando técnicas de identificación de sistemas.

Se agradece a Mario Ordaz Schroeder, por su apoyo en la creación de los programas de cómputo y sus valiosos comentarios durante el desarrollo de todo el trabajo.

Se agradece a Luis Eduardo Pérez Rocha por sus aportes para mejorar el programa de graficación usado.

Se hace un especial reconocimiento a Roberto Meli Piralla y Enzo Faccioli por ser quienes concretaron el proyecto para la instrumentación del edificio.

10. REFERENCIAS

Aire, C y Murià Vila, D (1993), "Evaluación de las propiedades mecánicas de un edificio de 14 niveles", Informe interno, Proyecto 2561, Instituto de Ingeniería, UNAM, enero

Avilés, J. y Perez-Rocha, L. E. (1996), "Evaluation of interaction effects on the system period and the system damping due to foundation embedment and layer depth", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15, 1, pages 11-27

Beck, J.L. y Jennings, P.C. (1980), "Structural Identification Using Lineal Models and Earthquake Records", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 8, pp. 145-160

Beck, J.L. (1978), "Determining models of structures from earthquake records", Report No EERL 78-01, California Institute of Technology, Pasadena

Bendat, J.S. y Piersol, A.G. (1989), "Random Data. Analysis and Measurement Procedure", Wiley Interscience, New York

Durrani, N.; Mau, S. T.; Abouhashish, A. y Yi, Li. (1994), "Earthquake Response of Flat-Slab Buildings", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120 (3), March, 947-964

Esteva, L y Mendoza, E (1989), "Influencia de la interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica inelástica de edificios", Reporte de Investigación, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), México

Ewins, D.J. (1986), "Modal Testing: Theory and Practice", Research Studies Press Ltd., J. Wiley & Sons Inc.

Fuentes Olivares, L. (2000), "Modelos Calibrados de un Edificio Instrumentado", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, noviembre

González Alcorta, R.; Murià Vila D. y Nájera Díaz D. (1994), "Respuesta teórica y experimental de una estructura prototipo con dispositivos disipadores de energía" Informe Interno, proyecto 2555, Instituto de Ingeniería, UNAM, abril

Jennings, P. C. y Bielak, J. (1973), "Dynamics of building-soil interaction", Bulletin of the Seismological Society of America, 63, 1, February, pages 9-48

Li, Yi y Mau S.T. (1990), "A Computer Program for Multiple Input-Multiple Output System Identification Using Building Seismic Records". Research Report UHCEE 90-07, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston, August

Li, Yi y Mau S. T. (1991), "A Case Study of MIMO System Identification Applied to Building Seismic Records", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 20, pp. 1045-1064

Li, Yi y Mau S. T. (1997), "Learning from recorded earthquake motion of buildings", Journal of Structural Engineering, 123 (1), January, pp. 62-69

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

Luco, J. E. (1980), "Soil-structure interaction and identification of structural models", Proc. ASCE, Specialty Conference, Knoxville, Tennessee

Luco, J. E.; Trifunac, M. D. y Wong, H. L. (1987), "On the apparent change in dynamic behavior of a nine-story reinforced concrete building", Bulletin of the Seismological Society of America, 77, 6, December, pp 1961-1983

Meli, R.; Murià-Vila, D; Quaas, R; Faccioli, E. y Paolucci, R. (1994), "Estudio de los efectos de sitio y la respuesta estructural de un edificio en la ciudad de México ante sismos", Informe de actividades del tercer año, patrocinado por CONACYT y CEE, proyecto 6514

Meli, R.; Faccioli, E.; Murià-Vila, D.; Quaas, R. and Paolucci, R. (1998), "Study of site effects and seismic response of an instrumented building in Mexico City", *Journal of Earthquake Engineering*, 2 (1), pp. 89-111

Mendoza, L.; Reyes, A. y Luco, J. E. (1991), "Ambient vibration tests of the Mexicali General Hospital", *Earthquake Spectra*, 7, 2, May, pp. 281-300

Murià Vila, D.; Alcántara L.; Durán R., Macías M.; Maldonado S. y Pérez L.E. (1997), "Edificios Instrumentados", *Macrosismo de Manzanillo*, Editor Arturo Tena Colunga, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Universidad de Colima y Gobierno del estado de Colima, septiembre, Colima, Col. México., pp. 197-232

Murià Vila, D.; González Alcorta, R y Espinosa Aranda, J.M. (1993), "Efectos de interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de un edificio instrumentado", Informe azul, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, enero

Murià Vila, D.; Zapata Escobar, A. y Rodríguez Gutiérrez, G. (1999). "Programa para el cálculo de la coherencia", Instituto de Ingeniería, UNAM.

Murià Vila, D. y Rodríguez Gutiérrez, G. (2001), "Análisis de los registros sísmicos obtenidos de 1993 a 1998 en el edificio Jal", Informe azul, Instituto de Ingeniería, UNAM, en revisión

Ordaz, M.(1993), "Subrutinas de análisis de señales", Instituto de Ingeniería, UNAM

Ordaz, M. y Montoya, C. (2001), *Degtra A4*, Instituto de Ingeniería, UNAM

Pacheco, J. F. y Singh, S. K. (1995), "Estimation of ground motions in the Valley of Mexico from normal-faulting, intermediate-depth earthquakes in the subducted Cocos plate", *Earthquake Spectra*, 11, 2, May, pp. 233-247

Paolucci, R. (1993), "Soil-structure interaction effects on an instrumented building in Mexico City", *European Earthquake Engineering*, VII, 3, pp. 33-44

Pérez Roldán, J.H. (1995), "Desarrollo y evaluación de modelos aplicando técnicas de identificación de sistemas", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, noviembre

Rinawi, A. y Clough, R. (1992), "Improved amplitude fitting for frequency and damping estimation", Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference, Society for Experimental Mechanics, Bethel, Conn., pp. 893-898

Rosenblueth E. y Resendiz Núñez D. (1988), "Disposiciones reglamentarias de 1987 para tener en cuenta la interacción dinámica suelo-estructura. , Series del Instituto de Ingeniería No 509, enero

Stewart, J.P. y Fenves, G.L. (1998), "System identification for evaluating soil-structure interaction effects in buildings from strong motion recordings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, pp. 869-885

Támez González, E.; Rangel Núñez. J.L. y Holguín, E. (1997), "Diseño geotécnico de túneles", TGC geotecnia S.A. de C.V., Pág. 284

Toro Jaramillo, A. M. (1997), "Estimación de Parámetros Estructurales de un Edificio Instrumentado Aplicando una Técnica de Identificación Paramétrica Modal", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, octubre

APÉNDICES

APÉNDICE A

Tabla A1. Parámetros estimados con los modelos 3N6GT y 3N3GT para el evento 97-1 en los componentes T, R y L para los dos primeros modos de vibrar

PARÁMETROS		VENTANAS en s									
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.71	0.66	0.66	0.68	0.65	0.61	0.65	0.65	0.62	0.66
	$f_2 T$	2.57	2.48	2.41	2.40	2.39	2.39	2.39	2.41	2.55	2.42
	$f_1 R$	1.21	1.32	1.14	1.22	1.19	1.07	1.15	1.21	1.08	1.16
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	2.3	3.8	3.0	2.9	3.0	3.1	2.7	3.3	2.0	3.2
	$\zeta_2 T$	1.7	2.2	2.5	2.5	2.5	1.5	1.3	2.6	3.2	2.0
	$\zeta_1 R$	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.5
ERROR (%)	Azotea T	7.2	7.3	6.2	7.3	7.0	4.8	5.3	6.3	6.1	5.7
	N11 T	8.8	8.3	5.9	8.4	8.9	5.4	6.2	7.7	7.0	7.5
	N6 T	10.4	9.5	7.4	8.8	8.6	6.6	7.3	8.8	8.2	8.2
	Azotea R	57.6	51.7	76.0	75.8	38.0	40.8	61.3	53.6	19.4	47.1
	N11 R	58.3	54.4	70.4	75.1	36.5	38.7	54.9	54.4	21.9	40.6
	N6 R	60.1	57.6	74.9	83.8	39.5	43.3	69.2	54.8	26.3	49.2
	Total	14.6	10.3	12.7	14.3	12.6	8.9	9.1	15.4	9.5	9.6

PARÁMETROS		VENTANAS en s									
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.67	0.61	0.60	0.60	0.60	0.59	0.60	0.60	0.59	0.60
	$f_2 L$	2.73	2.48	2.49	2.34	2.42	2.41	2.43	2.33	2.40	2.38
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	4.1	7.4	5.7	5.3	4.9	4.4	4.1	4.9	4.8	4.6
	$\zeta_2 L$	3.4	3.4	4.0	2.9	1.4	4.6	2.5	2.5	7.6	3.7
ERROR (%)	Azotea	10.5	12.7	10.8	8.0	6.2	6.5	6.8	4.3	5.4	6.2
	N11	9.7	12.7	10.3	8.0	8.0	5.7	8.7	5.8	5.9	5.8
	N6	16.8	19.6	16.5	15.6	11.3	10.3	11.5	10.1	11.8	10.3
	Total	10.7	13.2	11.1	8.6	7.3	6.6	7.9	5.4	6.2	6.4

Tabla A2. Parámetros estimados con los modelos 3N6GT y 3N3GT para el evento 97-2 en los componentes T, R y L para los dos primeros modos de vibrar

PARÁMETROS		VENTANAS en s							
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
FRECUENCIA (Hz)	f_1 T	0.72	0.71	0.73	0.72	0.68	0.66	0.70	0.69
	f_2 T	2.62	2.60	2.58	2.53	2.52	2.51	2.44	2.49
	f_1 R	1.20	1.11	1.19	1.11	1.28	1.25	1.26	1.34
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ_1 T	1.47	2.75	2.34	3.77	2.92	1.71	2.45	1.93
	ζ_2 T	1.00	2.24	1.53	1.48	1.88	0.50	1.35	1.21
	ζ_1 R	8.00	3.11	2.50	4.47	2.50	1.79	1.05	2.50
ERROR (%)	Azotea T	18.8	10.2	13.4	11.8	13.4	11.1	6.2	6.0
	N11 T	23.5	10.8	15.5	11.4	13.3	11.7	7.3	7.0
	N6 T	29.3	16.6	21.8	16.5	15.6	11.9	7.8	8.2
	Azotea R	85.6	94.2	77.4	93.8	63.0	61.8	69.6	78.8
	N11 R	56.4	73.9	67.4	77.0	60.2	52.7	55.9	55.8
	N6 R	88.0	90.0	74.1	84.2	63.6	68.5	73.6	83.9
	Total	29.6	22.9	26.5	18.0	20.8	16.7	10.0	9.1

PARÁMETROS		VENTANAS en s							
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
FRECUENCIA (Hz)	f_1 L	0.81	0.82	0.82	0.73	0.76	0.77	0.75	0.74
	f_2 L	3.29	3.24	3.23	3.08	3.06	3.03	2.95	3.05
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ_1 L	4.52	4.43	5.81	3.65	5.57	4.19	5.02	4.56
	ζ_2 L	3.27	3.95	4.95	5.52	4.34	4.40	3.82	3.07
ERROR (%)	Azotea	11.6	10.2	12.6	13.2	8.7	17.6	12.1	16.3
	N11	12.1	9.4	11.6	12.1	7.6	18.7	10.0	13.9
	N6	16.7	14.4	19.3	14.7	15.1	24.3	17.8	21.9
	Total	12.2	10.3	12.8	12.9	8.9	18.5	11.9	15.9

Tabla A3. Parámetros estimados con los modelos 3N6GT y 3N3GT para el evento 98-1 en los componentes T, R y L para los dos primeros modos de vibrar

PARÁMETROS		VENTANAS en s					
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
FRECUENCIA (Hz)	f_1 T	0.70	0.70	0.68	0.67	0.66	0.71
	f_2 T	2.54	2.53	2.43	2.56	2.51	2.49
	f_1 R	1.42	1.52	1.55	1.32	1.25	1.32
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ_1 T	1.88	1.45	1.77	1.78	1.50	2.54
	ζ_2 T	0.68	0.91	1.87	1.25	1.12	1.39
	ζ_1 R	1.20	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
ERROR (%)	Azotea T	8.1	11.5	6.3	9.5	4.4	6.3
	N11 T	8.7	11.8	7.7	11.2	7.0	8.6
	N6 T	14.9	20.3	9.0	14.7	6.4	9.7
	Azotea R	59.2	68.68	89.9	56.1	90.3	78.1
	N11 R	61.6	67.5	90.9	57.6	83.5	78.1
	N6 R	69.2	72.7	92.0	58.0	90.1	77.7
	Total	11.3	22.0	23.7	22.3	13.6	16.0

PARÁMETROS		VENTANAS en s					
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
FRECUENCIA (Hz)	f_1 L	0.85	0.79	0.80	0.79	0.77	0.81
	f_2 L	3.23	3.00	3.04	3.14	2.95	2.98
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ_1 L	2.41	2.75	2.96	2.80	3.36	2.84
	ζ_2 L	2.15	0.13	1.43	2.50	0.60	3.21
ERROR (%)	Azotea	17.0	10.5	10.6	16.2	8.1	9.8
	N11	15.9	10.3	9.9	14.9	8.5	8.8
	N6	30.3	16.6	18.0	23.0	13.8	16.5
	Total	17.8	11.0	11.0	16.3	8.7	10.0

Tabla A4. Parámetros estimados con los modelos 3N6GT y 3N3GT para el evento 99-1 en los componentes T, R y L para los dos primeros modos de vibrar

PARÁMETROS		VENTANAS en s																							
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200	200-210	210-220	220-230	230-240
FRECUENCIA (Hz)	f ₁ T	0.66	0.67	0.64	0.62	0.57	0.56	0.54	0.51	0.50	0.50	0.50	0.52	0.51	0.48	0.51	0.49	0.49	0.51	0.51	0.51	0.55	0.52	0.52	0.51
	f ₂ T	2.48	2.62	2.32	2.26	2.22	2.18	2.25	1.99	1.90	1.83	1.60	1.43	1.85	1.47	1.50	1.73	1.64	1.82	1.73	2.00	2.10	1.91	1.96	2.08
	f ₁ R	1.56	1.40	1.32	1.30	1.11	1.13	0.98	0.95	0.95	0.97	1.00	0.96	0.92	0.93	0.87	0.94	0.90	0.92	0.95	0.91	1.02	0.90	1.04	1.00
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ ₁ T	2.55	1.58	4.76	1.64	3.92	2.64	4.09	3.68	4.35	6.40	2.02	3.70	5.65	3.91	5.28	3.72	4.08	4.01	3.81	4.22	4.32	3.25	3.62	3.67
	ζ ₂ T	1.62	1.44	1.93	4.10	2.48	1.05	1.05	3.54	7.20	6.23	7.20	5.06	5.06	3.00	3.94	3.00	3.00	3.00	4.30	4.75	3.00	2.93	1.77	3.00
	ζ ₁ R	2.50	2.82	2.80	1.61	1.97	2.82	3.00	2.61	1.60	2.36	1.40	2.42	4.17	3.00	4.22	4.22	2.40	3.00	4.15	2.60	3.00	6.50	3.00	3.00
ERROR (%)	Azotea T	39.6	39.5	28.6	22.3	18.3	11.6	14.7	16.8	17.4	14.7	8.5	7.7	9.5	4.6	6.4	4.3	5.1	6.5	5.7	8.2	8.9	8.1	5.3	5.6
	N11 T	49.0	37.9	26.4	16.4	14.2	11.0	15.5	17.6	15.5	14.5	9.2	11.6	11.6	8.2	9.6	8.1	8.4	11.3	10.8	11.9	12.3	10.9	7.3	10.4
	N6 T	45.8	58.2	46.6	44.5	29.4	19.0	17.7	18.6	25.4	20.5	10.3	11.9	11.7	7.2	14.2	8.5	10.3	9.0	9.5	13.6	13.2	12.1	9.5	7.9
	Azotea R	92.0	65.5	73.8	49.1	55.6	91.2	56.5	40.5	39.8	43.2	76.3	38.0	22.9	23.0	43.2	67.1	54.4	59.6	29.7	63.5	56.4	67.6	61.8	59.4
	N11 R	96.2	70.5	83.8	74.7	76.2	95.2	71.8	57.7	62.2	66.1	90.9	56.8	52.9	73.3	73.7	69.6	82.2	85.9	79.4	90.4	88.1	79.3	89.3	86.9
	N6 R	94.1	73.9	84.4	69.6	64.0	87.4	61.3	48.0	60.5	45.3	76.7	43.2	33.3	38.6	44.6	58.5	50.3	54.0	37.5	67.1	56.4	62.4	61.1	60.0
Total	59.8	50.8	37.0	28.0	23.8	20.5	24.5	22.1	22.7	22.4	17.3	17.1	14.6	11.4	13.7	13.5	12.7	14.8	12.5	16.0	15.3	13.9	12.4	13.5	

PARÁMETROS		VENTANAS en s																							
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200	200-210	210-220	220-230	230-240
FRECUENCIA (Hz)	f ₁ L	0.87	0.85	0.80	0.71	0.66	0.59	0.57	0.54	0.54	0.53	0.54	0.55	0.55	0.56	0.57	0.56	0.53	0.56	0.58	0.59	0.59	0.57	0.54	0.60
	f ₂ L	3.29	3.24	2.99	2.91	2.69	2.56	2.27	2.23	2.20	2.19	2.22	2.17	2.20	2.24	2.27	2.22	2.32	2.33	2.26	2.15	2.34	2.33	2.18	2.47
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ ₁ L	3.38	3.86	7.12	8.10	7.72	9.36	8.96	8.96	6.66	5.58	6.19	5.69	6.49	5.06	5.39	5.77	3.08	5.55	5.54	5.10	5.09	4.93	3.33	3.43
	ζ ₂ L	2.78	3.62	6.91	6.56	9.14	9.14	5.88	2.09	2.09	2.20	5.25	4.22	5.32	5.41	4.52	4.62	7.78	3.14	2.48	2.51	2.62	3.61	3.61	3.61
ERROR (%)	Azotea	17.3	12.1	16.0	17.3	19.9	23.1	14.0	22.5	11.3	7.6	12.7	14.1	9.5	22.0	11.2	7.9	9.5	10.2	10.6	8.4	8.0	9.1	14.6	9.1
	N11	22.3	17.9	17.7	20.8	26.3	19.0	19.0	24.6	10.4	9.0	16.4	18.9	15.1	27.6	15.2	10.7	15.4	14.4	16.6	11.5	11.6	14.2	20.9	12.2
	N6	37.1	19.8	27.7	35.1	31.9	38.8	25.0	37.6	24.0	16.4	18.3	18.9	15.7	28.5	14.8	10.0	15.2	12.4	14.5	13.3	12.2	12.3	23.0	22.8
	Total	20.2	14.8	17.5	20.2	23.2	23.5	16.8	24.5	12.1	9.0	14.5	16.2	12.2	24.5	13.0	9.0	12.2	12.0	13.2	9.9	9.7	11.4	17.7	13.6

Tabla A5. Parámetros estimados con los modelos 3N6GT y 3N3GT para el evento 99-2 en los componentes T, R y L para los dos primeros modos de vibrar

PARÁMETROS		VENTANAS en s													
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.60	0.57	0.58	0.57	0.55	0.54	0.54	0.53	0.55	0.55	0.56	0.55	0.55	0.56
	$f_2 T$	2.21	2.14	2.10	2.06	2.15	2.05	2.01	1.98	2.07	2.02	2.08	2.01	2.00	1.96
	$f_1 R$	1.14	1.12	1.21	1.13	1.12	1.08	1.05	0.98	1.01	1.00	1.00	1.11	1.04	1.00
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	4.61	4.19	3.95	2.37	5.43	3.73	4.35	3.43	3.52	3.95	3.88	3.14	2.82	2.83
	$\zeta_2 T$	2.88	2.88	2.32	3.24	2.74	3.00	3.21	1.06	2.71	2.10	1.63	1.64	1.64	2.14
	$\zeta_1 R$	2.68	2.68	2.68	2.68	5.65	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.40	1.40
ERROR (%)	Azotea T	13.8	7.8	14.3	11.6	17.7	6.0	5.2	4.1	6.7	4.4	6.1	4.6	6.2	6.9
	N11 T	12.2	7.8	10.8	12.1	20.5	7.8	6.3	7.1	8.2	5.3	8.8	5.0	6.9	9.3
	N6 T	26.9	15.7	25.4	14.8	33.0	8.9	7.4	7.4	10.6	8.1	12.5	8.7	11.2	15.4
	Azotea R	83.1	88.3	83.7	89.3	65.6	74.7	78.0	53.4	54.8	54.4	87.0	69.5	51.0	80.1
	N11 R	87.5	89.8	86.6	88.9	64.7	60.3	87.9	79.3	54.9	63.8	93.7	73.9	53.0	81.3
	N6 R	86.5	88.8	92.1	86.9	81.8	75.6	72.3	62.4	64.4	58.4	87.3	77.7	66.1	81.0
	Total	25.1	16.9	22.6	29.8	35.5	11.0	9.7	10.6	9.9	8.5	11.4	7.5	9.1	12.0

PARÁMETROS		VENTANAS en s													
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.64	0.63	0.60	0.61	0.62	0.61	0.60	0.62	0.62	0.61	0.61	0.64	0.64	0.63
	$f_2 L$	2.60	2.54	2.45	2.44	2.43	2.50	2.48	2.49	2.54	2.46	2.46	2.58	2.54	2.51
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	5.66	4.94	5.43	6.28	5.63	8.79	4.34	4.86	4.78	3.99	3.70	3.14	4.44	5.20
	$\zeta_2 L$	4.99	3.30	3.64	4.42	3.67	3.58	5.19	3.07	5.03	3.76	2.06	2.06	2.66	2.66
ERROR (%)	Azotea	13.1	9.6	9.9	9.4	7.8	11.0	10.4	10.2	17.0	7.5	8.3	24.6	13.8	25.8
	N11	13.2	10.0	10.6	9.2	7.6	11.7	12.2	12.9	19.1	11.6	10.2	33.0	17.4	29.2
	N6	22.0	17.3	15.0	19.6	19.4	23.2	19.1	22.9	31.9	22.6	17.7	59.6	37.0	56.4
	Total	13.9	10.4	10.6	10.3	8.9	12.3	11.7	12.4	19.0	10.6	9.8	31.8	17.6	30.9

Tabla A6. Parámetros estimados con los modelos 3N6GT y 3N3GT para el evento 99-3 en los componentes T, R y L para los dos primeros modos de vibrar

PARÁMETROS		VENTANAS en s															
		40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.52	0.51	0.51	0.46	0.43	0.45	0.44	0.43	0.46	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	0.45	0.46
	$f_2 T$	2.05	1.93	1.93	1.82	1.71	1.55	1.35	1.51	1.19	1.70	1.46	1.51	1.48	1.28	1.23	1.40
	$f_1 R$	1.06	1.06	0.91	0.91	0.84	0.80	0.79	0.89	0.78	0.77	0.91	0.89	0.85	0.86	0.86	0.93
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	3.32	4.63	7.16	4.07	7.14	7.60	7.34	4.68	4.67	5.44	6.87	10.60	6.04	11.52	8.25	7.48
	$\zeta_2 T$	3.79	3.79	1.03	1.03	0.66	0.66	0.66	1.87	1.97	4.86	1.48	3.00	3.00	3.00	3.11	3.49
	$\zeta_1 R$	3.00	1.60	0.46	0.64	3.00	2.41	3.00	3.03	2.51	3.00	2.61	3.00	1.06	6.44	2.68	1.53
ERROR (%)	Azotea T	9.9	11.4	12.2	11.9	10.1	8.8	6.8	7.7	10.0	4.0	3.7	6.1	7.2	6.9	4.9	5.2
	N11 T	9.1	8.9	10.0	10.2	6.1	7.5	6.9	6.9	10.4	5.3	5.2	5.9	6.4	7.7	6.5	6.7
	N6 T	13.5	21.9	24.3	20.5	17.1	14.2	14.3	14.6	17.5	8.8	7.8	15.5	11.9	11.4	12.2	9.0
	Azotea R	62.4	66.0	42.6	48.2	52.8	70.1	66.7	70.7	68.5	96.3	64.6	84.5	86.3	73.2	75.3	72.2
	N11 R	53.4	66.4	36.9	51.6	40.9	74.6	63.9	70.2	73.9	96.1	52.7	86.0	82.8	68.8	73.4	61.1
	N6 R	65.3	70.8	44.9	52.6	59.3	73.1	61.7	61.5	65.1	86.5	56.8	85.8	76.9	58.2	73.8	68.5
	Total	14.3	16.7	16.1	15.1	14.0	13.3	11.8	12.6	15.2	11.0	6.8	16.4	11.5	10.7	12.5	8.6

PARÁMETROS		VENTANAS en s															
		40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.61	0.57	0.56	0.54	0.52	0.51	0.52	0.52	0.51	0.49	0.50	0.53	0.52	0.56	0.53	0.54
	$f_2 L$	2.59	2.41	2.41	2.39	2.43	2.16	2.04	2.16	2.14	2.03	2.05	2.03	2.04	2.19	1.91	2.29
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	7.76	12.60	13.83	7.25	5.48	5.87	7.43	5.80	6.15	6.60	7.30	5.89	6.28	6.04	5.48	4.60
	$\zeta_2 L$	8.33	7.30	0.44	0.44	0.44	0.44	6.66	1.72	4.35	4.35	3.00	1.38	3.00	8.44	5.39	3.43
ERROR (%)	Azotea	12.4	19.6	18.4	17.2	7.5	5.2	6.8	3.4	5.1	5.1	5.6	7.6	5.7	7.0	3.2	7.4
	N11	10.3	16.3	15.9	12.2	7.0	5.7	6.3	4.6	6.5	5.6	6.0	7.7	5.9	7.3	3.7	8.5
	N6	25.8	31.0	36.8	35.7	24.6	12.4	15.0	9.2	10.9	11.6	11.0	10.2	10.8	14.3	9.0	15.1
	Total	13.3	19.7	19.5	17.8	9.7	6.1	7.4	4.4	6.1	5.9	6.2	7.8	6.2	7.8	4.0	8.5

Tabla A7. Parámetros estimados con los modelos 1N2GT y 1N1GT para el evento 97-2 en los componentes T, R y L para los dos primeros modos de vibrar

PARÁMETROS		VENTANAS en s							
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.72	0.71	0.74	0.73	0.69	0.67	0.70	0.69
	$f_2 T$	2.69	2.61	2.58	2.58	2.52	2.50	2.46	2.48
	$f_1 R$	1.21	1.11	1.19	1.31	1.28	1.25	1.26	1.34
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	1.6	2.9	2.7	4.2	3.1	1.7	2.5	2.0
	$\zeta_2 T$	1.8	2.2	1.4	3.0	1.6	0.6	3.0	0.7
	$\zeta_1 R$	8.6	3.1	3.0	1.2	3.0	1.9	1.1	2.1
ERROR (%)	Azotea T	18.8	10.3	14.3	13.0	13.4	11.1	6.4	5.9
	Azotea R	85.6	94.4	78.5	74.7	65.0	61.7	68.6	76.4
	Total	26.9	22.9	26.0	16.9	20.9	16.5	9.6	8.2

PARÁMETROS		VENTANAS en s							
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.80	0.81	0.82	0.71	0.75	0.77	0.74	0.72
	$f_2 L$	3.28	3.23	3.21	3.07	3.03	2.98	2.95	3.03
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	4.5	4.2	5.9	3.1	5.5	4.3	4.7	3.9
	$\zeta_2 L$	2.6	4.3	4.8	6.9	3.9	3.3	3.4	3.0
ERROR (%)	Azotea	11.5	10.2	12.5	13.0	8.7	17.4	11.7	15.3
	Total -	11.5	10.2	12.5	13.0	8.7	17.4	11.7	15.3

Tabla A8. Parámetros estimados con los modelos 1N2GT y 1N1GT para el evento 98-1 en los componentes T, R y L para los dos primeros modos de vibrar

PARÁMETROS		VENTANAS en s					
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.73	0.72	0.69	0.68	0.67	0.71
	$f_2 T$	2.58	2.56	2.44	2.47	2.50	2.50
	$f_1 R$	1.42	1.51	1.55	1.57	1.39	1.46
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	2.44	1.76	1.81	1.84	1.62	2.50
	$\zeta_2 T$	2.50	2.50	1.61	1.33	0.91	1.32
	$\zeta_1 R$	1.52	2.50	2.50	2.50	2.50	2.27
ERROR (%)	Azotea T	9.6	14.7	6.4	9.7	4.4	6.2
	Azotea R	58.7	69.0	90.4	91.9	74.9	70.0
	Total	11.3	22.7	21.3	32.1	10.1	13.5

PARÁMETROS		VENTANAS en s					
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.86	0.80	0.81	0.80	0.78	0.82
	$f_2 L$	3.25	3.09	3.00	2.93	2.94	2.99
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	2.61	3.09	3.05	2.76	3.52	2.94
	$\zeta_2 L$	1.90	2.10	1.09	1.09	1.77	1.77
ERROR (%)	Azotea	16.9	10.9	10.6	16.2	7.9	9.7
	Total	16.9	10.9	10.6	16.2	7.9	9.7

Tabla A9. Parámetros estimados con los modelos 1N2GT y 1N1GT para el evento 99-1 en los componentes T, R y L para los dos primeros modos de vibrar

PARÁMETROS		VENTANAS en s												
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.66	0.67	0.64	0.62	0.57	0.56	0.54	0.51	0.50	0.50	0.50	0.52	0.51
	$f_2 T$	2.48	2.62	2.32	2.26	2.22	2.18	2.25	1.99	1.90	1.83	1.60	1.43	1.85
	$f_1 R$	1.56	1.40	1.32	1.30	1.11	1.13	0.98	0.95	0.95	0.97	1.00	0.96	0.92
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	2.55	8.82	6.90	1.64	3.92	2.64	4.09	3.68	4.35	6.40	2.02	3.70	5.65
	$\zeta_2 T$	1.62	0.15	12.80	11.38	9.26	2.48	3.00	3.00	4.98	6.23	7.20	1.70	3.83
	$\zeta_1 R$	2.50	2.82	2.80	1.61	1.97	2.82	3.00	2.61	1.60	2.36	1.40	2.42	4.17
ERROR (%)	Azotea T	39.6	39.5	28.6	22.3	18.3	11.6	14.7	16.8	17.4	14.7	8.5	7.7	9.5
	Azotea R	92.0	65.5	73.8	49.1	55.6	91.2	56.5	40.5	39.8	43.2	76.3	38.0	22.9
	Total	59.8	50.8	37.0	28.0	23.8	20.5	24.5	22.1	22.7	22.4	17.3	17.1	14.6

PARÁMETROS		VENTANAS en s												
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.85	0.82	0.77	0.67	0.65	0.58	0.56	0.54	0.55	0.53	0.53	0.54	0.53
	$f_2 L$	3.29	3.24	2.99	2.91	2.69	2.56	2.27	2.23	2.20	2.19	2.22	2.17	2.20
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	4.75	4.40	5.74	8.47	11.55	6.37	3.76	8.46	5.14	4.43	1.54	2.09	4.08
	$\zeta_2 L$	3.98	5.91	5.81	5.81	3.03	3.03	2.21	3.51	3.51	2.78	2.78	3.00	1.42
ERROR (%)	Azotea	29.6	22.3	24.6	24.9	36.0	27.0	17.4	25.0	14.9	8.5	23.1	17.5	18.2
	Total	29.6	22.3	24.6	24.9	36.0	27.0	17.4	25.0	14.9	8.5	23.1	17.5	18.2

Tabla A10. Parámetros estimados con los modelos 1N2GT y 1N1GT para el evento 99-2 en los componentes T, R y L para los dos primeros modos de vibrar

PARÁMETROS		VENTANAS en s													
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.60	0.56	0.58	0.57	0.55	0.54	0.53	0.53	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.56
	$f_2 T$	2.21	2.13	2.09	2.06	2.15	2.07	2.03	1.98	2.09	2.03	2.08	2.01	2.02	1.93
	$f_1 R$	0.98	0.93	0.97	0.98	1.12	1.05	1.05	1.00	1.01	1.00	0.99	1.10	1.04	1.00
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	5.07	4.54	4.12	2.38	5.70	3.57	4.41	3.57	3.48	4.09	3.89	3.36	2.90	2.80
	$\zeta_2 T$	2.96	2.26	2.53	3.09	2.74	2.92	3.20	0.93	2.01	1.94	1.58	1.02	1.94	1.14
	$\zeta_1 R$	2.68	2.68	2.68	2.68	5.99	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	0.63	0.63	1.58	1.58
ERROR (%)	Azotea T	13.8	8.3	13.4	12.3	18.9	5.5	5.1	4.4	6.7	4.1	6.1	4.4	6.1	8.5
	Azotea R	79.4	78.1	84.6	81.2	65.5	70.4	75.6	59.0	56.6	56.0	86.2	68.2	50.4	79.9
	Total	21.7	14.1	20.9	27.5	32.8	9.6	8.3	9.5	8.8	6.9	8.8	6.1	7.8	10.3

PARÁMETROS		VENTANAS en s													
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.66	0.64	0.62	0.63	0.63	0.62	0.61	0.63	0.63	0.62	0.61	0.64	0.63	0.63
	$f_2 L$	2.58	2.55	2.48	2.50	2.37	2.52	2.48	2.50	2.50	2.47	2.45	2.66	2.54	2.52
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	6.24	5.38	6.55	7.09	6.08	9.21	4.61	4.97	4.82	4.21	3.80	3.76	4.46	5.10
	$\zeta_2 L$	5.04	2.81	3.59	6.02	3.20	3.20	4.97	3.29	7.12	3.85	2.01	2.00	2.99	2.99
ERROR (%)	Azotea	13.7	9.9	11.2	10.6	9.1	11.3	10.5	10.6	17.0	7.7	8.3	24.5	13.8	25.8
	Total	13.7	9.9	11.2	10.6	9.1	11.3	10.5	10.6	17.0	7.7	8.3	24.5	13.8	25.8

Tabla A11. Parámetros estimados con los modelos 1N2GT y 1N1GT para el evento 99-3 en los componentes T, R y L para los dos primeros modos de vibrar

PARÁMETROS		VENTANAS en s									
		40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
FRECUENCIA (Hz)	f_1 T	0.52	0.51	0.51	0.46	0.43	0.45	0.44	0.43	0.46	0.45
	f_2 T	2.06	1.91	1.90	1.82	1.75	1.62	1.70	1.48	1.41	1.66
	f_1 R	1.06	1.06	0.91	0.91	0.84	0.80	0.79	0.89	0.78	0.77
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ_1 T	3.32	4.63	7.16	4.07	7.14	7.60	7.34	4.68	13.26	5.44
	ζ_2 T	3.79	3.79	1.08	1.08	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	2.00
	ζ_1 R	3.00	1.60	0.46	0.64	3.00	2.41	3.00	3.03	2.51	3.00
ERROR (%)	Azotea T	31.8	17.7	15.6	16.2	13.5	11.2	13.1	13.9	14.4	10.8
	Azotea R	65.3	84.6	39.0	35.5	83.3	65.1	86.0	62.2	57.7	88.2
	Total	34.0	20.5	17.9	17.0	19.0	14.1	16.4	15.7	16.5	13.1

PARÁMETROS		VENTANAS en s									
		40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
FRECUENCIA (Hz)	f_1 L	0.61	0.57	0.56	0.54	0.53	0.51	0.52	0.52	0.51	0.49
	f_2 L	2.59	2.41	2.40	2.40	2.49	2.16	2.10	2.15	2.12	2.02
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ_1 L	7.88	12.61	14.50	7.65	5.36	5.90	7.21	5.81	6.20	6.55
	ζ_2 L	8.40	7.10	0.67	0.44	4.27	0.44	14.04	1.39	4.29	3.11
ERROR (%)	Azotea	12.7	19.4	18.2	17.2	6.8	5.1	6.6	3.2	5.1	5.0
	Total	12.7	19.4	18.2	17.2	6.8	5.1	6.6	3.2	5.1	5.0

Tabla A12. Parámetros estimados con el modelo simplificado de Luco por ventanas para el evento 93-11 en los componentes T y L

PARÁMETROS	VENTANAS														
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150
f_1 (Hz)	0.41	0.41	0.41	0.37	0.36	0.36	0.35	0.36	0.35	0.35	0.36	0.35	0.35	0.37	0.361
$X_{T(OND)}$	9.02	10.99	29.78	46.39	67.11	38.77	32.11	11.12	11.12	20.88	69.73	56.38	50.60	25.14	23.87
$X_{O(OND)}$	0.38	0.31	1.14	1.61	2.48	1.84	1.17	1.24	1.24	1.20	1.49	0.59	1.17	0.65	0.44
$H\phi(OND)$	0.98	0.98	2.52	3.76	5.50	2.34	1.88	0.66	0.66	1.66	4.96	4.24	3.74	1.97	1.84
X_o/X_1	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.11	0.11	0.06	0.02	0.01	0.02	0.03	0.018
$H\phi/X_1$	0.11	0.09	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08	0.077
f_{H1}	1.73	2.11	1.79	1.72	1.61	1.43	1.59	0.92	0.91	1.26	2.09	2.90	2.00	1.97	2.28
f_c	1.30	1.44	1.45	1.36	1.30	1.52	1.51	1.57	1.51	1.29	1.38	1.30	1.35	1.36	1.35
f_1	0.45	0.44	0.44	0.40	0.39	0.38	0.37	0.40	0.40	0.38	0.37	0.36	0.37	0.39	0.38
K_{H1} (10^3 t/m)	68.26	101.49	73.52	67.31	59.25	46.54	57.71	19.39	19.06	36.39	99.63	192.04	91.30	88.23	119.25
K_C (10^6 t m/rad)	32.80	40.41	41.00	35.80	33.17	45.32	44.61	45.33	44.57	32.67	37.10	33.17	35.35	36.02	35.51
f_1	1.09	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.06	1.12	1.12	1.09	1.05	1.04	1.05	1.06	1.05
f_1															

PARÁMETROS	VENTANAS														
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150
\bar{f}_1 (Hz)	0.68	0.70	0.66	0.63	0.60	0.57	0.58	0.52	0.55	0.53	0.53	0.53	0.51	0.58	0.557
$X_{T(OND)}$	11.87	11.51	16.00	26.46	60.02	66.30	65.06	208.65	134.97	177.90	172.54	124.19	24.34	50.60	23.37
$X_{O(OND)}$	0.33	0.26	0.25	1.28	1.72	2.72	3.38	3.50	4.31	3.03	3.48	1.17	0.72	0.70	0.60
$H\phi(OND)$	2.79	2.77	3.84	5.64	11.32	12.48	11.44	29.01	22.54	28.29	27.87	18.62	3.91	8.73	3.60
X_o/X_1	0.03	0.02	0.02	0.05	0.03	0.04	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.025
$H\phi/X_1$	0.23	0.24	0.24	0.21	0.19	0.19	0.18	0.14	0.17	0.16	0.16	0.15	0.16	0.17	0.154
f_{H1}	3.47	3.90	4.52	2.40	3.00	2.39	2.12	3.38	2.59	3.39	3.17	4.57	2.49	4.16	2.94
f_c	1.40	1.41	1.35	1.35	1.38	1.32	1.36	1.39	1.34	1.31	1.32	1.35	1.27	1.39	1.41
f_1	0.80	0.82	0.77	0.74	0.69	0.66	0.66	0.57	0.62	0.58	0.59	0.58	0.57	0.65	0.62
K_{H1} (10^3 t/m)	256.81	324.30	435.27	122.98	192.54	121.75	96.34	243.61	143.42	245.71	214.01	446.00	132.39	368.79	184.36
K_C (10^6 t m/rad)	38.84	39.25	35.81	35.82	37.57	34.13	36.64	37.83	35.32	33.92	34.42	35.98	31.55	38.13	39.29
f_1	1.18	1.17	1.17	1.18	1.14	1.15	1.16	1.09	1.13	1.11	1.11	1.09	1.12	1.11	1.11
f_1															

Tabla A13. Parámetros estimados con el modelo simplificado de Luco por ventanas para el evento 94-3 en los componentes T y L

PARÁMETROS	VENTANAS													
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
f_1 (Hz)	0.38	0.34	0.34	0.34	0.34	0.30	0.31	0.31	0.33	0.32	0.32	0.34	0.33	0.33
X_1 (MED)	17.32	85.86	83.64	64.55	89.51	35.70	66.76	61.42	23.81	23.84	14.94	22.64	31.94	25.87
X_0 (MED)	0.69	2.52	2.52	2.87	1.45	1.97	1.97	1.59	1.26	1.39	1.01	1.51	0.82	0.57
$H\phi$ (MED)	1.69	6.36	6.21	4.73	7.29	2.48	4.54	4.41	2.11	2.08	1.24	1.68	1.91	2.12
X_0/X_1	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02	0.06	0.03	0.03	0.05	0.06	0.07	0.07	0.03	0.02
$H\phi/X_1$	0.10	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.08
f_{H1}	1.66	1.71	1.69	1.37	2.30	1.10	1.57	1.64	1.22	1.14	1.05	1.12	1.74	1.89
f_c	1.27	1.30	1.29	1.29	1.23	1.18	1.25	1.19	1.14	1.12	1.14	1.28	1.38	1.19
f_1	0.42	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.33	0.32	0.36	0.35	0.35	0.37	0.34	0.35
K_{H1} (10^3 t/m)	62.80	66.69	65.01	43.03	120.42	27.75	56.42	61.43	34.09	29.52	25.04	28.82	69.24	81.91
K_C (10^6 t/m/rad)	31.65	32.71	32.62	32.29	29.59	27.33	30.36	27.53	25.30	24.39	25.40	32.15	36.99	27.38
f_1	1.08	1.06	1.06	1.07	1.05	1.08	1.06	1.06	1.09	1.09	1.10	1.09	1.05	1.06
f_1														

PARÁMETROS	VENTANAS													
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
f_1 (Hz)	0.61	0.56	0.54	0.49	0.48	0.47	0.47	0.47	0.47	0.49	0.46	0.49	0.48	0.50
X_1 (MED)	8.23	62.64	42.94	279.96	392.20	174.01	182.62	178.19	31.95	48.15	48.65	27.73	58.98	51.21
X_0 (MED)	1.06	2.88	2.44	17.82	5.94	3.06	2.07	4.10	1.27	2.72	1.43	0.86	1.19	1.03
$H\phi$ (MED)	1.51	9.37	7.02	35.32	47.67	21.64	25.39	24.02	4.82	5.76	5.32	4.00	7.25	6.42
X_0/X_1	0.13	0.05	0.06	0.06	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02
$H\phi/X_1$	0.18	0.15	0.16	0.13	0.12	0.12	0.14	0.13	0.15	0.12	0.11	0.14	0.12	0.13
f_{H1}	1.42	2.20	1.91	1.62	3.27	2.95	3.70	2.58	1.99	1.72	2.25	2.32	2.86	3.00
f_c	1.41	1.44	1.33	1.36	1.36	1.31	1.25	1.26	1.21	1.40	1.38	1.27	1.37	1.42
f_1	0.76	0.63	0.62	0.55	0.52	0.50	0.51	0.51	0.53	0.54	0.50	0.54	0.52	0.55
K_{H1} (10^3 t/m)	42.85	103.31	78.21	56.18	228.53	185.98	292.00	142.41	84.53	63.21	108.01	114.67	174.57	191.56
K_C (10^6 t/m/rad)	38.95	40.88	35.05	36.50	36.65	33.91	30.72	31.27	28.80	38.50	37.38	31.81	36.98	39.51
f_1	1.26	1.13	1.15	1.13	1.08	1.08	1.09	1.10	1.12	1.12	1.09	1.11	1.09	1.09
f_1														

Tabla A14. Parámetros estimados con el modelo simplificado de Luco por ventanas para el evento 95-1 en los componentes T y L

PARÁMETROS	VENTANAS												
	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150
f_1 (Hz)	0.37	0.35	0.32	0.30	0.30	0.31	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30	0.300
$X_{T(MED)}$	10.26	189.56	149.21	152.01	162.21	136.34	136.34	61.61	70.29	75.18	75.43	26.84	22.27
$X_{O(MED)}$	0.26	7.01	6.06	2.10	2.28	2.55	2.55	5.32	5.40	2.10	1.94	1.28	0.59
$H\phi_{(MED)}$	1.11	13.60	12.25	9.92	9.27	6.97	6.97	3.43	3.29	5.14	5.28	2.32	1.46
X_u/X_1	0.03	0.04	0.04	0.01	0.01	0.02	0.02	0.09	0.08	0.03	0.03	0.05	0.026
$H\phi/X_1$	0.11	0.07	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.07	0.07	0.09	0.066
f_H	2.00	1.57	1.37	2.18	2.16	1.93	1.92	0.91	0.93	1.54	1.61	1.20	1.59
f_C	1.16	1.36	1.16	1.21	1.29	1.41	1.40	1.36	1.43	1.19	1.18	1.07	1.21
f_i	0.40	0.37	0.34	0.31	0.31	0.32	0.32	0.34	0.32	0.32	0.32	0.33	0.32
$K_{T1} (10^3 \text{ t m})$	91.32	56.07	42.66	108.65	106.71	85.34	84.23	18.71	19.57	54.03	59.15	32.68	57.74
$K_C (10^6 \text{ t m/rad})$	26.31	35.79	26.15	28.51	32.57	38.62	38.12	35.94	39.72	27.42	26.94	22.30	28.72
\tilde{f}_1	1.07	1.06	1.07	1.04	1.04	1.04	1.04	1.10	1.08	1.05	1.05	1.08	1.05
\hat{f}_1													

PARÁMETROS	VENTANAS												
	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150
\tilde{f}_1 (Hz)	0.63	0.53	0.49	0.48	0.47	0.47	0.45	0.46	0.45	0.45	0.45	0.44	0.458
$X_{T(MED)}$	6.32	51.63	365.47	273.59	93.27	423.23	359.27	145.01	271.46	251.10	122.56	129.63	39.66
$X_{O(MED)}$	0.52	0.88	2.68	4.56	3.29	5.11	9.35	7.06	3.90	6.81	1.94	2.45	1.18
$H\phi_{(MED)}$	0.89	6.86	46.07	39.78	11.77	58.28	37.87	17.05	32.18	30.27	14.01	14.51	4.42
X_u/X_1	0.08	0.02	0.01	0.02	0.04	0.01	0.03	0.05	0.01	0.03	0.02	0.02	0.030
$H\phi/X_1$	0.14	0.13	0.13	0.15	0.13	0.14	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.112
f_H	1.84	3.44	4.86	3.11	2.11	3.59	2.40	1.74	3.13	2.28	3.02	2.72	2.24
f_C	1.67	1.46	1.38	1.24	1.32	1.26	1.41	1.32	1.29	1.28	1.33	1.32	1.36
f_i	0.73	0.58	0.53	0.52	0.52	0.51	0.50	0.51	0.48	0.49	0.49	0.48	0.50
$K_{T1} (10^3 \text{ t m})$	72.48	251.98	504.16	205.82	94.75	275.61	123.06	64.66	208.73	110.99	194.20	158.23	107.03
$K_C (10^6 \text{ t m/rad})$	55.04	41.87	37.75	30.38	34.13	31.14	39.14	34.47	32.57	32.17	34.69	34.33	36.66
\tilde{f}_1	1.16	1.09	1.08	1.10	1.10	1.09	1.03	1.11	1.08	1.09	1.08	1.08	1.09
\hat{f}_1													

Tabla A15. Parámetros estimados con el modelo simplificado de Luco por ventanas para el evento 95-2 en los componentes T y L

PARÁMETROS	VENTANAS												
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
f_1 (Hz)	0.35	0.34		0.32	0.30	0.31	0.32	0.31	0.30	0.32	0.30	0.30	0.31
X_1 (MED)	14.20	16.77		58.34	66.24	53.56	49.17	46.32	57.51	64.59	57.75	82.86	97.51
X_0 (MED)	0.29	0.27		0.74	1.16	1.35	1.78	0.83	0.64	1.82	2.74	2.00	2.08
$H\phi$ (MED)	0.91	1.11		3.73	4.72	4.39	2.46	1.97	3.31	4.32	3.17	5.42	6.18
X_o/X_1	0.02	0.02		0.01	0.02	0.03	0.04	0.02	0.01	0.03	0.05	0.02	0.02
$H\phi/X_1$	0.06	0.07		0.06	0.07	0.08	0.05	0.04	0.06	0.07	0.05	0.07	0.06
f_{11}	2.07	2.30		2.42	1.93	1.67	1.46	1.99	2.47	1.65	1.20	1.68	1.80
f_c	1.41	1.36		1.30	1.15	1.11	1.50	1.55	1.30	1.29	1.35	1.23	1.26
f_1	0.36	0.35		0.33	0.31	0.33	0.34	0.32	0.31	0.34	0.32	0.32	0.32
K_{11} (10^1 t m)	98.20	120.90		134.03	84.84	63.79	48.67	90.71	138.83	62.50	32.92	64.76	73.67
K_c (10^6 t m /rad)	38.74	36.16		32.95	25.78	24.23	43.63	46.98	32.96	32.65	35.30	29.59	30.76
f_1	1.05	1.04		1.04	1.05	1.06	1.05	1.03	1.04	1.05	1.06	1.05	1.05
f_1													

PARÁMETROS	VENTANAS												
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
f_1 (Hz)	0.53	0.52	0.47	0.48	0.47	0.47	0.45	0.46	0.47	0.45	0.45	0.45	0.45
X_1 (MED)	60.83	107.51	209.63	168.36	214.19	302.08	304.53	297.10	344.52	328.53	344.01	136.57	222.45
X_0 (MED)	0.94	1.55	3.01	2.69	3.32	3.75	2.89	3.58	7.97	6.11	7.49	3.64	2.90
$H\phi$ (MED)	7.82	12.85	23.84	19.29	24.30	33.60	34.82	33.58	38.19	38.48	38.24	15.64	24.11
X_o/X_1	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01
$H\phi/X_1$	0.13	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11
f_{11}	3.57	3.64	3.27	3.22	3.21	3.52	3.90	3.50	2.59	2.75	2.57	2.30	3.34
f_c	1.46	1.50	1.37	1.42	1.40	1.39	1.33	1.35	1.40	1.30	1.35	1.31	1.37
f_1	0.57	0.56	0.50	0.52	0.51	0.50	0.48	0.49	0.51	0.48	0.49	0.48	0.49
K_{11} (10^1 t m)	271.53	283.26	228.29	221.76	219.50	265.11	324.42	261.22	143.25	161.90	141.49	112.61	238.16
K_c (10^6 t m /rad)	42.11	44.10	37.07	39.86	38.62	38.07	34.69	35.86	38.52	33.11	35.67	33.72	36.91
f_1	1.09	1.08	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07	1.08	1.08	1.08	1.09	1.07
f_1													

Tabla A16. Parámetros estimados con el modelo simplificado de Luco por ventanas para el evento 97-1 en los componentes T y L

PARÁMETROS	VENTANAS									
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
f_1 (Hz)	0.71	0.66	0.66	0.68	0.65	0.61	0.65	0.65	0.62	0.66
X_T (MED)	72.01	83.03	78.94	74.04	76.42	63.43	83.31	31.84	54.01	27.38
X_O (MED)	2.46	6.43	5.65	6.71	6.98	6.38	6.05	3.13	2.39	3.01
$H\phi$ (MED)	23.96	28.46	24.13	23.58	20.81	19.02	26.07	8.50	14.41	7.11
X_o/X_T	0.03	0.08	0.07	0.09	0.09	0.10	0.07	0.10	0.04	0.11
$H\phi/X_T$	0.33	0.34	0.31	0.32	0.27	0.30	0.31	0.27	0.27	0.26
f_H	3.27	2.02	2.11	1.94	1.85	1.66	2.07	1.77	2.53	1.71
f_C	1.27	1.16	1.24	1.25	1.29	1.16	1.20	1.30	1.25	1.34
f_s	0.88	0.86	0.84	0.89	0.83	0.80	0.83	0.82	0.75	0.85
K_H (10^3 t/m)	293.85	112.06	122.38	103.22	93.56	75.59	117.27	85.72	176.10	79.87
K_C (10^6 t/m/rad)	37.15	31.13	35.23	36.11	38.59	31.18	33.48	38.76	35.84	41.58
f_1	1.25	1.32	1.27	1.31	1.27	1.31	1.28	1.27	1.20	1.28
f_1										

PARÁMETROS	VENTANAS									
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
f_1 (Hz)	0.67	0.61	0.60	0.60	0.60	0.59	0.60	0.60	0.59	0.60
X_T (MED)	33.32	52.73	75.79	52.50	110.82	32.06	88.36	71.47	24.18	27.61
X_O (MED)	1.29	4.23	4.49	2.95	3.05	0.98	3.63	3.42	2.60	2.78
$H\phi$ (MED)	3.53	3.94	5.22	4.01	10.52	2.98	8.69	6.91	2.14	2.66
X_o/X_T	0.04	0.08	0.06	0.06	0.03	0.03	0.04	0.05	0.11	0.10
$H\phi/X_T$	0.11	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10
f_H	2.86	1.79	2.05	2.13	3.01	2.82	2.47	2.28	1.51	1.58
f_C	2.06	2.21	2.27	2.17	1.93	1.92	1.90	1.91	1.98	1.92
f_s	0.74	0.67	0.65	0.66	0.64	0.63	0.65	0.65	0.68	0.69
K_H (10^3 t/m)	212.03	83.20	109.33	117.07	235.31	205.32	157.66	134.53	58.96	64.60
K_C (10^6 t/m/rad)	98.51	113.31	119.50	109.61	86.68	85.66	83.68	84.57	90.89	85.70
f_1	1.09	1.11	1.09	1.09	1.08	1.08	1.09	1.09	1.15	1.15
f_1										

Tabla A17. Parámetros estimados con el modelo simplificado de Luco por ventanas para el evento 97-2 en los componentes T y L

PARÁMETROS	VENTANAS							
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
f_1 (Hz)	0.72	0.71	0.73	0.72	0.68	0.66	0.70	0.69
X_T (MED)	18.32	29.12	22.99	28.16	31.46	68.39	39.70	27.19
X_O (MED)	0.46	0.77	1.03	0.87	1.65	3.37	1.90	1.76
$H\phi$ (MED)	6.43	10.09	7.68	9.44	10.32	20.18	13.06	8.61
X_o/X_T	0.03	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06
$H\phi/X_T$	0.35	0.35	0.33	0.34	0.33	0.30	0.33	0.32
f_H	3.88	3.74	2.96	3.52	2.55	2.55	2.74	2.33
f_C	1.26	1.25	1.31	1.29	1.23	1.26	1.27	1.27
f_1	0.90	0.89	0.92	0.90	0.86	0.81	0.88	0.88
K_H (10^3 t/m)	412.32	382.74	240.12	340.27	178.09	178.32	206.40	148.44
K_C (10^6 t m/rad)	36.63	36.07	39.54	38.34	34.97	36.60	36.94	37.29
$\frac{f_1}{f_1}$	1.25	1.25	1.26	1.24	1.27	1.23	1.26	1.27

PARÁMETROS	VENTANAS							
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
f_1 (Hz)	0.81	0.82	0.82	0.73	0.76	0.77	0.75	0.74
X_T (MED)	32.31	28.11	31.17	36.08	55.24	15.52	16.54	14.12
X_O (MED)	0.41	0.46	1.96	0.73	1.28	0.61	0.42	0.51
$H\phi$ (MED)	6.00	5.26	6.21	6.14	9.69	2.74	2.49	2.13
X_o/X_T	0.01	0.02	0.06	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04
$H\phi/X_T$	0.19	0.19	0.20	0.17	0.18	0.18	0.15	0.15
f_H	6.03	5.38	2.73	4.28	4.17	3.25	3.92	3.27
f_C	1.87	1.89	1.83	1.76	1.81	1.82	1.92	1.90
f_1	0.91	0.92	0.97	0.82	0.86	0.88	0.83	0.83
K_H (10^3 t/m)	941.39	750.08	193.75	474.78	450.94	273.00	397.73	276.98
K_C (10^6 t m/rad)	81.33	82.73	77.64	71.98	75.77	77.20	86.04	83.66
$\frac{f_1}{f_1}$	1.12	1.13	1.19	1.12	1.13	1.14	1.11	1.12

Tabla A18. Parámetros estimados con el modelo simplificado de Luco por ventanas para el evento 99-1 en los componentes T y L

PARÁMETROS	VENTANAS												
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
f_1 (Hz)	0.66	0.67	0.64	0.62	0.56	0.55	0.54	0.49	0.49	0.51	0.48	0.52	0.51
X_1 (MED)	1.21	4.30	14.19	137.21	572.79	534.31	478.88	461.75	380.39	57.24	335.23	174.33	92.56
X_0 (MED)	0.17	0.47	0.56	5.83	11.89	11.90	15.07	17.67	18.83	1.41	8.81	3.36	2.36
$H\phi$ (MED)	0.35	1.33	4.44	35.63	144.88	130.09	105.53	106.20	91.84	14.50	71.81	37.81	17.86
X_0/X_1	0.14	0.11	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.02	0.03	0.02	0.03
$H\phi/X_1$	0.29	0.31	0.31	0.26	0.25	0.24	0.22	0.23	0.24	0.25	0.21	0.22	0.19
f_{H1}	1.50	1.74	2.76	2.58	3.33	3.16	2.61	2.15	1.89	2.79	2.54	3.21	2.74
f_c	1.28	1.25	1.19	1.26	1.15	1.16	1.19	1.06	1.03	1.05	1.08	1.16	1.20
f_1	0.90	0.89	0.79	0.74	0.65	0.64	0.62	0.57	0.58	0.60	0.55	0.59	0.58
K_{H1} (10^3 t/m)	61.82	83.06	208.72	182.50	304.78	274.06	186.96	126.57	97.82	212.92	176.94	282.71	205.86
K_C (10^6 t m/rad)	37.87	36.00	32.43	36.71	30.75	30.81	32.81	25.89	24.66	25.45	26.67	30.91	33.42
f_1	1.36	1.33	1.24	1.19	1.17	1.16	1.15	1.17	1.19	1.17	1.14	1.14	1.13
f_1													

PARÁMETROS	VENTANAS												
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
f_1 (Hz)	0.87	0.85	0.80	0.71	0.66	0.59	0.57	0.54	0.54	0.53	0.54	0.55	0.55
X_1 (MED)	4.35	20.45	35.87	93.62	58.89	125.75	123.41	118.30	219.69	126.11	45.00	69.44	51.17
X_0 (MED)	0.12	0.67	1.09	6.94	3.50	11.26	7.17	4.93	10.41	4.27	3.41	3.11	0.94
$H\phi$ (MED)	1.14	5.23	8.77	19.99	11.01	18.18	21.89	16.78	33.23	18.57	5.96	10.01	8.37
X_0/X_1	0.03	0.03	0.03	0.07	0.06	0.09	0.06	0.04	0.05	0.03	0.08	0.04	0.02
$H\phi/X_1$	0.26	0.26	0.24	0.21	0.19	0.14	0.18	0.14	0.15	0.15	0.13	0.14	0.16
f_{H1}	4.47	3.93	3.85	2.18	2.26	1.65	1.98	2.21	2.07	2.41	1.64	2.17	3.40
f_c	1.69	1.67	1.61	1.53	1.52	1.54	1.35	1.43	1.38	1.37	1.48	1.44	1.35
f_1	1.04	1.02	0.95	0.86	0.77	0.69	0.66	0.60	0.61	0.59	0.62	0.62	0.61
K_{H1} (10^3 t/m)	518.17	399.45	383.10	123.22	132.90	70.45	101.35	126.88	111.52	150.17	69.78	122.49	299.76
K_C (10^6 t m/rad)	66.23	64.98	60.21	54.30	53.60	55.39	42.12	47.29	44.35	43.87	50.62	48.29	42.56
f_1	1.20	1.20	1.19	1.21	1.17	1.17	1.16	1.12	1.13	1.12	1.15	1.12	1.11
f_1													

Tabla A19. Parámetros estimados con el modelo simplificado de Luco por ventanas para el evento 99-2 en los componentes T y L

PARÁMETROS	VENTANAS													
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
f_1 (Hz)	0.60	0.57	0.58		0.55	0.54	0.54	0.53	0.55	0.55	0.56	0.55	0.55	0.56
X_T (m/D)	15.04	33.05	33.59		67.88	130.99	41.34	77.35	52.24	52.24	18.95	39.45	39.45	34.23
X_O (m/D)	1.64	1.72	1.97		1.60	3.26	1.41	1.74	2.03	2.03	0.79	1.31	1.31	0.57
$H\phi$ (m/D)	3.87	8.43	8.69		15.79	28.88	9.11	16.88	11.32	11.32	4.17	8.61	8.61	7.81
X_O/X_T	0.11	0.05	0.06		0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02
$H\phi/X_T$	0.26	0.26	0.26		0.23	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23
f_{H1}	1.56	2.14	2.05		3.07	2.94	2.51	3.03	2.39	2.39	2.35	2.59	2.59	3.71
f_c	1.23	1.17	1.18		1.18	1.19	1.19	1.18	1.23	1.23	1.24	1.22	1.22	1.22
f_1	0.77	0.69	0.70		0.63	0.62	0.62	0.61	0.64	0.64	0.65	0.63	0.63	0.64
K_{H1} (10^3 t/m)	66.61	126.16	115.70		258.46	236.45	172.26	251.40	156.90	156.90	151.41	183.84	183.84	377.51
K_C (10^6 t m/rad)	34.74	31.58	32.26		32.24	32.79	32.80	31.92	34.63	34.63	35.37	34.36	34.36	34.10
f_1	1.28	1.20	1.21		1.15	1.15	1.16	1.14	1.16	1.16	1.16	1.15	1.15	1.14
f_1														

PARÁMETROS	VENTANAS													
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
f_1 (Hz)	0.64	0.63	0.60	0.61	0.62	0.61	0.60	0.62	0.62	0.61	0.61	0.64	0.64	0.63
X_T (m/D)	5.54	12.33	60.12	40.87	32.28	23.35	27.80	15.75	20.60	17.90	17.33	7.66	3.24	4.39
X_O (m/D)	0.53	0.60	2.51	1.06	0.88	1.99	0.39	0.67	0.51	0.51	0.30	0.33	0.24	0.16
$H\phi$ (m/D)	0.91	1.99	10.53	7.10	5.76	3.85	4.70	2.86	3.84	3.33	2.90	1.41	0.62	0.83
X_O/X_T	0.10	0.05	0.04	0.03	0.03	0.09	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.04	0.07	0.04
$H\phi/X_T$	0.17	0.16	0.18	0.17	0.18	0.16	0.17	0.18	0.19	0.19	0.17	0.18	0.19	0.19
f_{H1}	1.74	2.38	2.46	3.17	3.13	1.75	4.24	2.51	3.29	3.01	3.88	2.57	1.97	2.75
f_c	1.57	1.56	1.43	1.46	1.46	1.50	1.45	1.45	1.43	1.41	1.48	1.49	1.46	1.44
f_1	0.77	0.72	0.69	0.69	0.70	0.72	0.67	0.71	0.70	0.69	0.68	0.74	0.76	0.72
K_{H1} (10^3 t/m)	78.03	146.79	156.43	260.32	254.10	79.27	465.60	162.93	280.68	234.31	389.60	170.96	100.91	195.26
K_C (10^6 t m/rad)	57.10	56.58	47.29	49.26	49.52	51.93	49.03	48.75	47.44	46.04	51.15	51.34	49.36	48.34
f_1	1.20	1.14	1.14	1.13	1.13	1.19	1.11	1.15	1.13	1.14	1.11	1.15	1.19	1.15
f_1														

Tabla A20. Parámetros estimados con el modelo simplificado de Luco por ventanas para el evento 99-3 en los componentes T y L

PARÁMETROS	VENTANAS															
	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200
f_1 (Hz)	0.52	0.50	0.51	0.46	0.43	0.43	0.43	0.43	0.46	0.45	0.43	0.45	0.43	0.43	0.46	0.450
X_T (MED)	149.71	678.18	651.74	632.91	247.46	179.32	301.61	51.45	69.28	214.51	73.52	101.48	66.65	54.76	91.83	20.58
X_O (MED)	5.87	30.81	9.13	23.50	14.01	9.61	3.83	4.25	2.13	5.06	4.36	1.73	3.81	1.98	2.71	0.38
$H\phi$ (MED)	30.57	142.74	151.62	136.86	47.10	34.54	58.45	8.68	14.31	43.99	15.03	17.20	11.88	10.23	15.93	4.09
X_O/X_T	0.04	0.05	0.01	0.04	0.06	0.05	0.01	0.08	0.03	0.02	0.06	0.02	0.06	0.04	0.03	0.019
$H\phi/X_T$	0.20	0.21	0.23	0.22	0.19	0.19	0.19	0.17	0.21	0.21	0.20	0.17	0.18	0.19	0.17	0.199
f_H	2.25	2.01	3.70	2.05	1.55	1.59	3.27	1.28	2.25	2.51	1.51	2.95	1.54	1.94	2.30	2.83
f_C	1.19	1.13	1.10	1.03	1.02	1.02	1.01	1.09	1.05	1.03	0.99	1.13	1.06	1.03	1.15	1.05
f_1	0.60	0.58	0.58	0.53	0.50	0.50	0.48	0.50	0.53	0.51	0.50	0.50	0.49	0.49	0.51	0.51
K_H (10^3 t/m)	139.11	111.00	374.60	114.93	65.88	69.60	293.87	45.20	139.12	173.31	62.88	239.22	65.22	103.30	144.60	219.70
K_C (10^6 t m/rad)	32.83	29.46	27.73	24.27	24.09	23.80	23.66	27.18	25.40	24.49	22.42	29.63	25.73	24.54	30.25	25.25
$\frac{f_1}{f_H}$	1.15	1.16	1.14	1.16	1.16	1.16	1.12	1.17	1.14	1.13	1.17	1.10	1.15	1.13	1.12	1.13

PARÁMETROS	VENTANAS															
	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200
f_1 (Hz)	0.61	0.57	0.56	0.54	0.52	0.51	0.52	0.52	0.51	0.49	0.50	0.53	0.52	0.56	0.53	0.540
X_T (MED)	135.61	96.50	245.17	173.43	261.45	72.02	126.90	61.71	101.59	101.03	37.26	65.98	36.34	26.56	52.58	16.31
X_O (MED)	5.59	4.37	10.68	5.22	5.07	3.92	6.48	3.53	2.69	3.54	1.07	1.37	2.03	0.49	1.53	0.71
$H\phi$ (MED)	36.44	17.08	69.79	49.33	70.28	16.41	26.33	11.92	21.19	18.37	5.71	14.67	9.98	6.96	10.40	3.35
X_O/X_T	0.04	0.05	0.04	0.03	0.02	0.05	0.05	0.06	0.03	0.04	0.03	0.02	0.06	0.02	0.03	0.044
$H\phi/X_T$	0.27	0.18	0.28	0.28	0.27	0.23	0.21	0.19	0.21	0.18	0.15	0.22	0.27	0.26	0.20	0.206
f_H	2.51	2.24	2.24	2.60	3.12	1.83	1.92	1.82	2.62	2.19	2.46	3.07	1.84	3.45	2.60	2.16
f_C	1.17	1.35	1.04	1.01	1.00	1.06	1.14	1.18	1.11	1.14	1.27	1.12	0.99	1.09	1.19	1.19
f_1	0.75	0.66	0.69	0.66	0.62	0.61	0.61	0.61	0.59	0.56	0.56	0.61	0.65	0.67	0.61	0.63
K_H (10^3 t/m)	163.55	130.05	130.46	175.65	252.78	86.52	95.88	85.75	178.19	124.26	157.32	244.67	87.91	308.00	174.83	121.09
K_C (10^6 t m/rad)	31.85	42.23	25.34	23.58	23.14	26.26	29.98	32.21	28.69	30.38	37.53	29.07	22.64	27.54	32.68	32.64
$\frac{f_1}{f_H}$	1.22	1.15	1.24	1.22	1.19	1.20	1.18	1.18	1.15	1.14	1.12	1.16	1.25	1.19	1.15	1.17

Tabla A21. Parámetros estimados con el modelo 1N1GACE para el evento 93-11 en los componentes T y L

PARÁMETROS		VENTANAS en s														
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.45	0.44	0.44	0.39	0.39	0.39	0.39	0.35	0.39	0.42	0.47	0.37	0.39	0.39	0.38
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	1.0	3.9	3.7	2.9	3.1	4.8	2.7	7.1	7.9	7.3	1.0	7.1	11.1	5.6	5.0
ERROR (%)	Total	32.8	30.4	30.3	29.9	30.3	27.6	40.0	49.7	45.4	39.3	37.7	17.6	29.9	14.1	10.4
FP (%)	Total	89.3	90.8	90.8	91.0	90.8	92.4	84.0	75.2	79.4	84.6	85.8	96.9	91.1	98.0	98.9

PARÁMETROS		VENTANAS en s														
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.81	0.79	0.75	0.72	0.67	0.67	0.67	0.61	0.61	0.59	0.60	0.58	0.58	0.65	0.66
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	5.5	9.3	12.0	10.0	10.8	12.1	9.1	11.7	16.2	9.0	18.7	10.2	8.6	5.5	11.1
ERROR (%)	Total	37.7	30.5	24.6	23.8	18.4	24.2	19.0	15.5	9.9	11.1	23.0	7.0	13.0	14.6	19.8
FP (%)	Total	85.8	90.7	94.0	94.3	96.6	94.1	96.4	97.6	99.0	98.8	94.7	99.5	98.3	97.9	96.1

Tabla A22. Parámetros estimados con el modelo 1N1GACE para el evento 94-3 en los componentes T y L

PARÁMETROS		VENTANAS en s													
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.41	0.42	0.36	0.34	0.34	0.38	0.35	0.34	0.34	0.34	0.34	0.36	0.34	0.34
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	1.0	3.2	5.0	5.8	1.7	7.2	7.5	3.1	4.9	3.2	3.0	1.0	2.6	5.7
ERROR (%)	Total	15.1	23.5	11.8	16.1	39.9	32.4	23.1	15.5	19.9	10.7	7.1	19.1	12.6	19.5
FP (%)	Total	97.7	94.5	98.6	97.4	84.1	89.5	94.7	97.6	96.0	98.9	99.5	96.7	98.8	97.1

PARÁMETROS		VENTANAS en s													
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	90-102	110-120	120-130
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.67	0.60	0.63	0.51	0.51	0.50	0.51	0.52	0.54	0.54	0.53	0.54	0.55	0.54
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	13.2	9.3	18.2	3.8	7.9	10.4	10.5	10.3	14.3	9.7	12.8	9.8	9.0	10.6
ERROR (%)	Total	18.8	8.0	23.9	10.7	15.4	13.0	12.0	12.0	21.2	16.9	16.9	12.0	8.1	12.0
FP (%)	Total	96.5	99.1	94.3	98.9	97.6	98.3	98.6	98.6	95.5	97.1	97.1	98.6	99.3	98.6

Tabla A23. Parámetros estimados con el modelo 1N1GACE para el evento 95-1 en los componentes T y L

PARÁMETROS		VENTANAS en s														
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150
FRECUENCIA (Hz)	f_{1T}			0.42	0.34	0.34	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31	0.30	0.31	0.32
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ_{1T}			4.2	3.0	3.1	4.2	4.6	4.8	3.9	3.9	1.9	3.0	7.3	2.1	5.1
ERROR (%)	Total			28.9	49.9	28.5	31.2	16.1	20.1	12.9	9.0	17.5	26.6	15.9	15.8	18.9
FP (%)	Total			91.7	75.1	91.9	90.3	97.4	95.9	98.3	99.2	96.9	92.9	97.5	97.5	96.4

PARÁMETROS		VENTANAS en s														
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	90-102	110-120	120-130	130-140
FRECUENCIA (Hz)	f_{1L}			0.68	0.61	0.56	0.53	0.52	0.51	0.51	0.50	0.48	0.49	0.49	0.49	0.49
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ_{1L}			7.7	11.9	10.8	7.8	6.2	5.8	4.7	7.2	6.3	3.4	8.6	4.8	6.7
ERROR (%)	Total			31.9	27.8	19.4	19.5	11.7	15.0	15.1	12.4	8.9	6.2	8.3	4.8	7.2
FP (%)	Total			89.8	92.3	96.3	96.2	98.6	97.8	97.7	98.5	99.2	99.6	99.3	99.8	99.5

Tabla A24. Parámetros estimados con el modelo 1N1GACE para el evento 95-2 en los componentes T y L

PARÁMETROS		VENTANAS en s												
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
FRECUENCIA (Hz)	f_{1T}	0.37	0.35	0.41	0.32	0.32	0.33	0.34	0.32	0.32	0.31	0.31	0.32	0.32
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ_{1T}	5.7	4.0	3.3	6.4	7.1	6.7	3.5	4.5	3.1	2.4	5.2	1.0	4.7
ERROR (%)	Total	22.2	19.1	34.6	19.5	20.8	11.7	17.4	15.2	9.2	24.4	14.8	16.3	9.8
FP (%)	Total	95.1	96.4	86.5	96.2	95.7	98.6	97.1	97.7	99.2	94.0	97.8	97.3	99.0

PARÁMETROS		VENTANAS en s												
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
FRECUENCIA (Hz)	f_{1L}	0.59	0.56	0.50	0.51	0.49	0.49	0.49	0.50	0.49	0.49	0.49	0.49	0.51
AMORTIGUAMIENTO (%)	ζ_{1L}	9.1	6.0	6.0	9.4	7.3	6.6	6.9	7.4	9.4	6.1	6.4	5.6	7.9
ERROR (%)	Total	13.3	7.9	7.8	14.4	7.2	13.7	8.1	6.8	10.7	8.8	7.2	7.0	9.3
FP (%)	Total	98.2	99.4	99.4	97.8	99.5	98.1	99.3	99.5	98.9	99.2	99.5	99.5	99.1

Tabla A25. Parámetros estimados con el modelo 1N1GACE para el evento 97-1 en los componentes T y L

PARÁMETROS		VENTANAS en s									
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.82	0.80	0.81	0.80	0.79	0.79	0.80	0.74	0.72	0.81
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	2.2	4.3	3.5	4.7	3.7	2.9	3.3	2.8	2.8	5.2
ERROR (%)	Total	25.4	20.9	18.7	23.6	17.8	14.8	14.4	15.5	15.7	20.4
FP (%)	Total	93.6	95.6	96.5	94.4	96.8	97.8	97.9	97.6	97.6	95.9

PARÁMETROS		VENTANAS en s									
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.73	0.64	0.63	0.66	0.64	0.62	0.63	0.63	0.63	0.64
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	5.1	7.1	6.2	8.2	4.5	4.6	3.6	3.7	5.8	4.9
ERROR (%)	Total	20.0	21.2	19.2	16.3	15.5	15.5	15.6	11.1	12.2	9.9
FP (%)	Total	96.0	95.5	96.3	97.3	97.6	97.6	97.6	98.8	98.5	99.0

Tabla A26. Parámetros estimados con el modelo 1N1GACE para el evento 97-2 en los componentes T y L

PARÁMETROS		VENTANAS en s								
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.91	0.87	0.89	0.84	0.83	0.84	0.82	0.83	
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	4.2	4.8	3.9	5.2	3.8	6.0	3.0	3.9	
ERROR (%)	Total	51.3	36.3	33.6	26.3	38.1	25.7	13.6	16.9	
FP (%)	Total	73.7	86.8	88.7	93.1	85.5	93.4	98.2	97.1	

PARÁMETROS		VENTANAS en s								
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.96	0.94	0.93	0.88	0.86	0.86	0.82	0.86	
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	9.5	8.6	9.2	9.2	8.5	5.4	7.1	9.3	
ERROR (%)	Total	20.8	19.7	23.2	20.3	17.5	25.6	22.1	26.6	
FP (%)	Total	95.7	96.1	94.6	95.9	97.0	93.4	95.1	92.9	

Tabla A27. Parámetros estimados con el modelo 1N1GACE para el evento 99-1 en los componentes T y L

PARÁMETROS		VENTANAS en s												
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.95	0.89	0.85	0.78	0.69	0.63	0.59	0.57	0.60	0.61	0.55	0.53	0.60
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	5.0	5.0	6.7	6.5	6.7	3.0	4.3	5.0	4.5	6.0	1.8	2.5	5.3
ERROR (%)	Total	43.7	51.7	27.2	33.6	25.4	15.9	19.4	19.2	21.0	17.9	13.3	16.1	15.0
FP (%)	Total	80.9	73.2	92.6	88.7	93.6	97.6	96.2	96.3	95.6	96.8	98.2	97.4	97.8

PARÁMETROS		VENTANAS en s											
		130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200	200-210	210-220	220-230	230-240	240-250
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 T$	0.54	0.60	0.57	0.58	0.60	0.62	0.61	0.63	0.58	0.62	0.59	0.66
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 T$	3.0	5.6	2.9	4.5	5.1	5.1	3.8	5.8	3.3	4.2	3.8	4.3
ERROR (%)	Total	10.1	9.9	7.3	6.4	7.8	9.7	14.9	11.0	11.0	8.4	6.8	24.0
FP (%)	Total	99.0	99.0	99.5	99.6	99.4	99.1	97.8	98.8	98.8	99.3	99.5	94.2

PARÁMETROS		VENTANAS en s												
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	1.07	1.00	0.97	0.84	0.74	0.69	0.64	0.61	0.60	0.59	0.60	0.61	0.61
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	4.0	5.8	13.7	11.4	7.6	11.9	8.6	12.3	4.9	5.8	7.3	6.4	8.0
ERROR (%)	Total	37.3	28.3	28.8	26.4	28.2	34.6	25.5	23.7	20.1	9.9	19.4	16.2	14.1
FP (%)	Total	86.1	92.0	91.7	93.0	92.0	88.0	93.5	94.4	96.0	99.0	96.3	97.4	98.0

PARÁMETROS		VENTANAS en s											
		130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200	200-210	210-220	220-230	230-240	240-250
FRECUENCIA (Hz)	$f_1 L$	0.64	0.64	0.63	0.63	0.63	0.66	0.65	0.67	0.65	0.65	0.67	0.68
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_1 L$	6.7	7.9	4.6	6.3	6.0	6.2	6.2	7.0	6.4	3.0	3.5	6.3
ERROR (%)	Total	22.9	16.1	10.6	16.3	14.2	11.0	13.2	12.7	11.7	22.3	25.3	26.8
FP (%)	Total	94.7	97.4	98.9	97.4	98.0	98.8	98.3	98.4	98.6	94.1	93.6	92.8

Tabla A28. Parámetros estimados con el modelo 1N1GACE para el evento 99-2 en los componentes T y L

PARÁMETROS		VENTANAS en s													
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
FRECUENCIA (Hz)	$f_{1,T}$	0.69	0.68	0.67	0.63	0.71	0.63	0.62	0.62	0.64	0.64	0.67	0.63	0.62	0.64
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_{1,T}$	3.3	4.6	4.0	5.4	1.6	4.9	4.4	4.3	4.8	4.0	5.0	3.3	3.3	3.2
ERROR (%)	Total	39.6	21.7	28.0	29.9	44.9	16.2	10.2	14.3	13.4	13.1	16.7	12.1	14.4	18.2
FP (%)	Total	84.3	95.3	92.2	91.1	79.8	97.4	99.0	97.9	98.2	98.3	97.2	98.5	97.9	96.7

PARÁMETROS		VENTANAS en s													
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	90-102	110-120	120-130
FRECUENCIA (Hz)	$f_{1,L}$	0.75	0.72	0.68	0.68	0.68	0.68	0.69	0.70	0.72	0.70	0.68	0.76	0.71	0.74
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_{1,L}$	6.9	7.0	9.3	8.9	7.8	11.2	6.2	7.2	6.3	6.3	4.6	8.1	5.2	7.8
ERROR (%)	Total	22.7	19.7	17.7	14.4	17.3	18.7	19.0	19.7	24.8	21.8	15.3	50.2	31.0	55.1
FP (%)	Total	94.9	96.1	96.9	97.9	97.0	96.5	96.4	96.1	93.9	95.3	97.7	74.8	90.4	69.7

Tabla A29. Parámetros estimados con el modelo 1N1GACE para el evento 99-3 en los componentes T y L

PARÁMETROS		VENTANAS en s															
		40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200
FRECUENCIA (Hz)	$f_{1,T}$	0.62	0.60	0.55	0.48	0.49	0.49	0.49	0.52	0.51	0.52	0.47	0.49	0.49	0.52	0.54	0.50
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_{1,T}$	1.0	7.7	7.0	3.4	3.5	3.4	3.0	4.9	5.8	5.8	4.6	3.0	3.9	4.4	4.1	5.7
ERROR (%)	Total	35.2	31.6	31.3	18.2	16.9	17.9	18.3	20.5	17.7	16.3	8.4	16.6	12.3	20.2	21.3	18.1
FP (%)	Total	87.2	89.7	90.2	96.7	97.2	96.8	96.6	95.8	96.9	97.2	99.3	97.2	98.3	95.8	95.4	96.7

PARÁMETROS		VENTANAS en s															
		40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200
FRECUENCIA (Hz)	$f_{1,L}$	0.79	0.69	0.64	0.61	0.60	0.61	0.55	0.58	0.61	0.54	0.56	0.61	0.53	0.70	0.56	0.55
AMORTIGUAMIENTO (%)	$\zeta_{1,L}$	3.0	3.6	11.7	3.0	4.0	1.3	3.0	2.4	2.5	8.1	13.5	1.0	4.3	3.3	1.0	1.0
ERROR (%)	Total	43.0	69.8	64.3	55.6	11.5	27.2	34.5	13.6	12.7	15.4	16.3	16.7	18.8	30.3	14.2	23.3
FP (%)	Total	81.5	51.3	58.7	69.1	98.7	92.6	88.1	98.2	98.4	97.6	97.3	97.2	96.5	90.8	98.0	94.6

Tabla A30. Parámetros estimados con los modelos de cabeceo 1N1GSCC y 1N1GACC para el evento 93-11 en los componentes T y L

MODELO	PARÁMETROS	VENTANAS en s																								
		0-10					10-20					20-30					30-40									
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f _i																								
	FP (%)	FP																								
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	0.77	1.14	1.71	2.39	1.38	76.66	0.67	1.17	1.29	1.64	2.30	72.08	0.64	1.01	1.22	1.69	2.29	72.31	0.61	0.87	1.37	1.69	2.28	
	FP (%)	FP	7.83	2.68	8.34	13.17	7.74	39.75	24.13	2.22	2.10	16.54	3.06	48.05	21.85	8.69	3.24	11.01	2.93	47.72	21.24	20.79	12.32	3.61	7.30	
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f _i																								
	FP (%)	FP																								
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f _i						0.75	1.30	1.61	2.43	0.82	49.63	0.78	0.89	1.29	1.57	2.32	59.94	0.74	0.93	1.27	1.59	2.30		
	FP (%)	FP						25.12	39.27	4.54	0.81	5.62	75.37	25.00	7.83	23.01	6.21	2.01	64.06	11.02	24.62	21.44	4.95	4.81		

MODELO	PARÁMETROS	VENTANAS en s																							
		40-50					50-60					60-70					70-80								
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	1.07	1.34	1.99	1.75	0.42	64.85	1.18	1.30	1.68	1.95	0.43	60.24	1.19	1.34	1.64	1.91	0.48	57.05	1.34	1.07	1.86	0.53	1.55
	FP (%)	FP	30.25	14.22	6.42	1.88	5.18	57.94	32.07	17.74	7.56	1.34	5.00	63.71	43.66	17.11	2.02	2.60	2.08	67.46	21.68	4.90	1.94	13.99	23.28
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	0.62	0.86	1.36	1.64	2.35	77.00	0.60	0.94	1.38	1.48	2.36	71.56	0.60	0.94	1.34	1.42	2.30	60.69	0.52	0.80	1.34	1.52	2.21
	FP (%)	FP	8.24	1.26	14.50	2.92	13.79	40.71	28.61	3.96	8.92	4.47	2.84	48.79	38.85	14.59	5.13	1.46	3.13	63.12	83.37	1.62	2.78	2.70	0.32
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	1.01	1.27	1.71	1.99	0.46	60.17	1.05	1.37	1.76	2.09	0.46	55.24	1.08	1.36	1.78	2.16	0.48	57.47	1.20	1.37	1.83	2.28	0.53
	FP (%)	FP	40.12	16.30	2.27	2.62	2.48	63.79	22.47	39.37	0.84	4.54	2.31	69.54	47.47	15.71	1.70	1.03	1.07	66.97	34.69	14.85	0.74	3.32	17.81
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	0.76	0.94	1.33	1.64	2.35	54.63	0.76	0.92	1.35	1.59	2.34	44.08	0.77	0.90	1.18	1.86	2.35	54.82	0.91	0.80	1.10	1.80	2.42
	FP (%)	FP	43.53	5.20	15.10	4.25	2.07	70.15	58.82	4.97	14.66	1.52	0.60	80.57	34.74	23.59	5.63	5.63	0.36	69.95	71.23	3.24	3.17	1.57	0.28

MODELO	PARÁMETROS	VENTANAS en s																							
		80-90					90-100					100-110					110-120								
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	1.31	1.04	2.01	0.51	1.51	45.53	1.03	1.55	1.43	0.49	1.88	46.20	0.98	1.46	1.80	0.50	1.61	39.17	1.12	1.50	0.47	1.70	1.25
	FP (%)	FP	7.07	25.27	3.78	25.75	17.40	79.27	4.42	45.22	3.05	25.45	0.53	78.66	22.28	17.25	2.35	41.89	0.89	84.66	7.52	13.67	34.62	2.07	1.33
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	0.47	0.81	1.31	1.53	2.03	48.76	0.53	0.85	1.37	1.60	1.93	32.46	0.52	1.02	1.56	1.63	2.16	36.70	0.49	0.92	1.55	1.80	2.21
	FP (%)	FP	66.71	1.30	1.63	5.70	0.88	76.22	80.25	0.49	0.82	7.61	0.30	89.46	75.86	0.59	8.15	0.98	0.95	86.53	79.27	0.95	2.47	0.56	0.07
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	1.02	1.25	1.45	2.12	0.49	36.25	0.83	1.36	1.54	2.17	0.51	36.51	0.52	1.43	1.52	2.19	1.06	31.36	0.54	1.45	1.56	2.06	0.41
	FP (%)	FP	42.99	9.48	9.65	2.06	22.67	86.86	39.20	18.70	0.58	0.31	27.87	86.67	62.45	16.00	4.31	0.15	7.06	90.16	55.49	10.99	6.46	0.54	2.87
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	0.77	0.99	1.06	1.55	2.49	42.18	0.80	0.95	1.54	1.14	2.53	35.42	0.82	0.92	1.57	1.20	2.51	42.20	0.87	0.95	1.19	1.56	2.60
	FP (%)	FP	72.42	5.78	0.71	1.84	1.47	82.21	78.31	1.55	7.02	0.31	0.27	87.45	76.57	1.46	2.73	0.55	0.89	82.19	75.06	1.45	1.03	0.43	0.22

MODELO	PARÁMETROS	VENTANAS en s																							
		120-130					130-140					140-150					150-160								
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	0.53	1.14	1.30	1.58	1.74	39.00	0.41	1.23	1.49	1.60	1.69	56.12	0.34	1.03	1.30	1.43	1.82	66.56					
	FP (%)	FP	55.60	7.76	2.81	18.28	0.33	84.79	60.10	5.56	2.47	0.23	0.15	68.51	44.62	5.75	1.21	2.78	1.34	55.70					
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	0.53	0.88	1.56	1.91	2.22	29.22	0.58	0.89	1.54	1.97	2.34	32.58	0.52	0.65	1.46	1.99	2.50	45.66					
	FP (%)	FP	86.79	0.48	3.70	0.13	0.48	91.46	85.67	0.46	2.04	0.57	0.65	89.38	63.25	12.24	3.30	0.24	0.13	79.15					
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	0.51	1.50	1.59	2.02	0.36	38.43	0.40	0.60	1.54	2.08	0.31	57.89	0.52	1.05	1.53	2.15	0.40	48.25					
	FP (%)	FP	61.04	22.28	0.34	0.17	1.40	85.23	46.34	14.81	1.63	1.05	2.67	66.50	46.93	7.01	10.18	2.92	9.70	76.74					
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f _i	0.95	0.82	1.14	1.55	2.34	38.74	0.61	1.08	1.20	1.55	2.40	32.60	0.81	1.07	1.23	1.51	2.30	38.06					
	FP (%)	FP	81.33	1.95	0.82	0.80	0.09	85.00	85.66	1.47	0.59	1.33	0.31	89.36	81.50	2.06	0.30	1.15	0.52	85.51					

Tabla A31. Parámetros estimados con los modelos de cabeceo 1N1GSCC y 1N1GACC para el evento 95-1 en los componentes T y L.

MODELO	PARÁMETROS	VENTANAS en s																							
		0-10				10-20				20-30				30-40											
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP										
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP																						
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP											0.45	0.66	1.37	2.24		67.84						
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP											15.96	16.38	9.11	12.54		53.98						
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP											1.22	2.10	0.71	1.82	0.41	57.30	0.98	2.23	0.64	0.32	1.78	68.60
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP											53.90	6.00	5.40	1.40	0.49	67.19	35.90	6.10	4.80	4.30	1.80	52.90

MODELO	PARÁMETROS	VENTANAS en s																									
		40-50				50-60				60-70				70-80													
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP												
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	2.28	1.03	1.38	0.43	1.68	61.70	1.30	1.43	0.50	2.10	1.00	59.50	1.08	2.38	1.52	0.48	1.17	69.10	1.38	2.35	0.46	1.54	1.67	38.56
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	20.90	13.50	10.90	7.80	5.30	58.40	31.70	13.10	9.70	6.30	3.40	64.20	21.20	17.00	6.10	3.40	2.50	50.20	53.80	13.00	12.40	3.00	2.90	85.10
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	0.47	0.64	1.45	2.19		51.21	0.50	1.31	1.49	1.75		42.16	0.51	0.65	1.48	2.19		64.67	0.48	0.60	1.41	2.36		27.51
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	50.40	2.95	13.32	7.10		73.77	41.68	11.87	18.32	10.36		82.22	21.23	7.26	27.96	1.73		58.17	49.30	1.73	37.04	4.37		92.43
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	0.71	1.15	1.28	2.04	2.22	57.20	1.33	1.17	0.51	2.05	2.31	55.90	1.18	1.99	1.27	2.48	0.44	59.20	0.68	1.23	1.31	2.09	2.36	46.30
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	25.10	13.50	12.80	12.40	3.40	67.20	23.80	23.10	13.90	7.30	0.60	68.70	39.22	12.80	8.70	2.20	2.00	64.92	50.00	23.40	2.90	1.50	0.67	78.47
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	1.16	0.44	2.24	1.77		58.70	1.09	0.62	1.86	0.50	1.24	49.00	1.24	0.54	0.71	2.39	1.86	49.00	1.03	0.47	1.59	0.78	2.37	30.90
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	42.90	17.40	4.00	1.30		65.60	53.80	8.20	6.90	4.80	2.18	75.88	59.20	10.60	4.00	1.20	0.94	75.94	78.50	4.70	3.40	2.30	1.40	90.30

MODELO	PARÁMETROS	VENTANAS en s																									
		80-90				90-100				100-110				110-120													
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP												
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	1.04	1.30	2.15	1.49	0.58	64.40	2.12	1.36	0.49	1.49	1.09	48.30	1.27	0.43	2.19	1.19	1.51	52.10	1.40	0.45	2.39	1.65	1.12	45.10
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	15.00	10.40	5.80	5.60	1.80	58.60	36.30	18.20	9.10	8.30	4.80	76.70	38.80	23.20	6.40	2.60	2.00	71.00	46.90	28.20	2.90	1.30	1.00	80.30
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	0.51	0.59	1.40	2.38		59.45	0.52	0.40	1.43	2.26		43.55	0.44	0.60	1.35	2.21		25.93	0.47	0.58	1.24	2.21		58.06
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	40.73	7.98	14.26	1.64		64.61	23.58	36.84	17.96	2.65		81.03	70.97	2.68	18.16	1.47		93.28	60.98	0.81	3.26	1.24		66.28
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	1.24	1.45	0.74	2.08	2.29	52.10	2.10	1.33	0.51	1.15	1.09	52.70	1.08	0.41	1.26	1.38	2.36	49.10	0.55	1.21	1.32	2.06	2.31	46.04
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	37.60	19.10	7.90	5.60	2.70	72.90	26.60	20.20	11.80	10.80	4.00	73.40	36.00	25.00	9.10	3.90	1.90	75.90	58.80	17.00	2.00	0.36	0.32	78.48
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	1.14	1.02	0.47	2.37	1.54	28.40	1.05	0.40	1.45	2.36	1.53	46.10	1.02	1.31	0.44	1.59	2.20	33.80	1.11	0.46	1.25	1.60	2.26	28.60
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	80.80	4.40	3.60	1.03	0.88	90.71	65.00	7.90	5.50	0.28	0.13	78.81	78.20	5.50	3.50	0.78	0.45	88.43	86.80	3.50	0.83	0.36	0.27	91.76

MODELO	PARÁMETROS	VENTANAS en s																									
		120-130				130-140				140-150				150-160													
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP	ε	FP												
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	0.45	1.39	1.10	2.39	1.77	68.50	1.33	0.35	1.01	1.88	2.29	52.40	1.22	0.41	2.23	0.92	1.89	54.70						
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	35.04	12.00	4.52	1.14	0.39	53.09	25.50	25.30	13.70	5.00	3.00	72.50	30.20	26.50	6.50	5.10	1.80	70.10						
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	0.41	1.33	2.15			33.64	0.47	1.40	2.34			17.49	0.44	1.41	2.31			29.85	0.49	1.60	2.35			49.97
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	73.19	14.04	1.46			88.69	83.98	11.78	1.18			96.94	79.38	9.78	1.93			91.09	69.72	4.09	1.22			75.03
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	0.97	0.45	1.21	1.28	2.11	54.80	1.30	0.73	0.45	2.16	2.27	54.30	0.49	1.23	0.79	2.17	2.41	56.60						
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	37.70	19.10	10.60	1.40	1.10	69.90	30.30	31.10	4.40	2.90	0.88	69.58	33.70	20.70	7.70	5.60	0.30	68.00						
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	1.06	0.42	1.25	1.70	2.19	31.20	1.11	0.47	2.11	1.21		26.30	1.03	0.49	2.15	1.17		27.30						
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz) FP (%)	f, l	FP	83.30	5.00	0.88	0.59	0.51	90.28	87.60	3.30	1.32	0.89		93.11	87.80	3.13	1.14	0.49		92.56						

Tabla A32. Parámetros estimados con los modelos de cabeceo 1N1GSCC y 1N1GACC para el evento 97-2 en los componentes T y L

MODELO	PARÁMETROS		VENTANAS en s																							
			0-10						10-20						20-30						30-40					
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	1 05	0 51	0 86	1 32	1 62	80 67	1 08	0 87	1 26	1 64	0 50	88 75	1 08	0 75	1 14	1 51	0 57	63 63	1 05	0 66	1 15	1 41	0 56	35 89
	FP (%)	FP	6 13	15 07	6 43	2 07	3 09	32 79	6 30	6 17	2 44	4 20	2 08	21 18	8 37	27 90	1 53	4 97	16 75	59 51	11 20	40 35	1 15	4 18	30 04	87 12
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0 78	0 94	1 29	1 60	2 37	44 00	0 78	0 90	1 39	1 82	2 22	47 19	0 75	0 88	1 52	1 82	2 30	68 36	0 78	0 89	1 30	1 81	2 20	45 28
	FP (%)	FP	61 78	13 54	3 20	0 46	1 65	80 64	55 53	7 41	11 56	1 16	2 07	77 73	21 27	15 70	13 26	1 54	1 50	53 27	58 95	8 51	3 42	1 59	4 78	77 25
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0 95	0 44	1 50	1 66	2 19	55 65	0 87	0 51	1 21	1 68	2 20	42 90	0 92	0 48	1 21	1 72	2 25	45 71	0 82	0 61	1 08	1 74	2 16	32 36
	FP (%)	FP	51 99	8 20	6 23	2 07	0 55	69 03	69 85	1 54	6 33	3 63	0 25	81 60	63 16	9 50	4 51	0 68	1 26	79 10	77 03	5 11	5 55	1 29	0 59	89 56
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0 72	0 84	1 30	1 54	2 35	50 51	0 74	0 94	1 27	1 39	2 35	46 59	0 75	1 02	1 27	1 39	2 28	52 29	0 69	1 05	1 27	1 36	2 34	41 91
	FP (%)	FP	57 51	9 28	3 85	2 44	1 40	74 49	58 33	2 98	8 34	7 88	0 76	78 30	21 34	11 39	33 28	5 43	1 23	72 66	66 95	8 52	3 22	1 70	2 04	82 42

MODELO	PARÁMETROS		VENTANAS en s																							
			40-50						50-60						60-70						70-80					
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0 57	0 75	1 02	1 54	1 16	47 59	0 63	0 70	0 98	1 26	1 47	43 62	0 65	0 89	1 16	1 45		28 55	0 64	0 91	1 12	1 52		29 38
	FP (%)	FP	33 27	26 24	12 40	4 70	0 74	77 35	65 28	0 16	11 75	2 53	1 24	80 97	86 48	2 54	2 11	0 71		91 85	87 75	0 55	2 19	0 87		91 37
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0 75	0 90	1 17	1 88	2 17	48 21	0 75	0 85	1 17	1 78	2 16	63 74	0 70	0 91	1 06	1 98	2 18	68 86	0 72	0 99	1 07	1 95	2 32	62 69
	FP (%)	FP	43 07	18 13	2 09	1 67	11 79	76 76	16 49	3 91	33 65	2 11	3 21	59 37	29 81	1 37	7 12	5 33	6 96	52 58	34 26	16 56	2 10	1 45	6 33	60 70
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0 80	0 49	1 05	1 76	2 28	50 14	0 65	0 84	1 00	1 65	2 12	36 10	0 81	0 62	0 88	1 63	2 12	23 08	0 85	0 62	1 13	1 67	1 96	24 69
	FP (%)	FP	42 39	13 00	15 60	2 31	1 57	74 86	64 23	8 64	11 33	0 95	1 82	86 96	90 29	1 46	2 39	0 26	0 26	94 66	88 59	1 20	3 63	0 14	0 34	93 90
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0 65	1 05	1 24	1 35	2 27	52 88	0 60	1 06	1 25	1 41	2 38	56 05	0 75	1 16	1 38	1 53	2 51	59 54	0 62	1 20	1 34	1 47	2 47	56 90
	FP (%)	FP	44 03	12 44	7 38	0 88	7 32	72 04	24 20	22 70	11 03	9 09	1 56	68 58	26 16	25 05	9 45	0 82	3 06	64 54	37 66	9 56	13 45	2 54	4 42	67 62

MODELO	PARÁMETROS		VENTANAS en s																							
			80-90						90-100						100-110						110-120					
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l																								
1N1GSCC	FP (%)	FP																								
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l																								
1N1GACC	FP (%)	FP																								

MODELO	PARÁMETROS		VENTANAS en s																							
			120-130						130-140						140-150						150-160					
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l																								
1N1GSCC	FP (%)	FP																								
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l																								
1N1GACC	FP (%)	FP																								

Tabla A34. Parámetros estimados con los modelos de cabeceo 1N1GSCC y 1N1GACC para el evento 99-3 en los componentes T y L

MODELO	PARÁMETROS		VENTANAS en s																											
			40-50				E FP				50-60				E FP				60-70				E FP				70-80			
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l							0.46	0.77	1.39	2.15			37.93	0.46	0.56	1.01	1.37			39.79	0.45	1.36						28.37
	FP (%)	FP							67.13	3.13	14.26	1.09			85.61	64.01	1.14	0.79	18.22			84.16	63.65	28.30					91.95	
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l		0.62	0.95	1.70	2.50	3.18	0.39	0.70	0.91	1.51	2.4	45.41	0.56	0.85	1.47	2.44	66.16	0.51	0.64	0.91	1.43	2.24	57.18					
	FP (%)	FP		66.07	11.03	9.20	2.70	89.00	61.98	1.70	9.68	3.59	2.43	79.38	31.02		17.96	6.07	1.18	56.23	38.06	7.68	13.46	9.19	0.45	68.84				
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.92	1.20	2.11			64.26	0.88	1.15	1.41	2.31		28.73	0.93	1.23	1.38	1.83	2.29	27.27	0.95	1.20	1.40	2.26				31.10		
	FP (%)	FP	47.26	1.72	9.73	9.73		68.44	85.24	0.40	2.84	3.25		91.73	80.87	1.18	4.64	2.09	3.66	92.44	81.80	1.32	4.00	3.20				90.32		
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.43	0.95	1.20	1.55	1.99	40.51	0.46	0.63	0.87	1.32	2.00	45.50	0.44	0.84	1.50	1.55	1.92	33.82	0.42	0.77	1.39	1.54	1.89			39.70		
	FP (%)	FP	4.30	68.40	2.28	2.20	5.60	82.78	12.10	50.40	10.80	4.10	1.30	78.70	23.30	56.20	7.90	0.40	0.80	88.60	16.00	65.50	0.57	0.72	1.40			84.19		

MODELO	PARÁMETROS		VENTANAS en s																										
			80-90				E FP				90-100				E FP				100-110				E FP				110-120		
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.44	1.33	1.48	2.21			0.46	1.37	1.45	2.26			32.13	0.44	1.32	1.44	2.31			27.84	0.46	1.32	1.49	2.17			39.51
	FP (%)	FP	71.10	9.49	6.83	2.45			89.87	77.42	11.57	0.37	1.27			90.63	73.91	16.28	1.16	0.90		92.25	72.75	4.76	6.63	0.25			84.39
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.49	0.61	0.95	1.50	2.45	19.00	0.56	0.64	0.89	1.55	2.54	43.57	0.53	0.66	0.85	1.57			43.64	0.56	0.69	0.81	1.69	2.61			21.59
	FP (%)	FP	81.33	1.42	1.00	12.81	0.30	96.86	73.15	1.36	1.41	4.64	0.50	81.06	69.15	5.25	4.12	1.67			80.19	91.70	0.53	0.35	1.98	0.71			95.27
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.75	1.35	1.51	2.63			35.11	0.52	0.62	1.52	2.38		34.35	1.04	1.44	2.20			41.24	1.08	1.53	2.35					45.46
	FP (%)	FP	68.39	14.99	4.00	3.20			90.58	5.71	70.53	11.66	0.30		88.20	77.88	2.88	2.23			82.99	70.46	8.24	0.64					79.34
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.43	0.78		1.95	2.11	15.61	0.44	0.86	1.14	1.52	2.11	24.96	0.42	0.70	0.90	1.85			25.92	0.46	0.82	1.48	1.63				20.10
	FP (%)	FP	2.00	92.80		0.14	0.48	95.72	7.40	84.80	0.78	0.31	0.48	93.77	19.20	70.80	2.10	1.10			93.20	10.10	84.90	0.20	0.82				96.02

MODELO	PARÁMETROS		VENTANAS en s																											
			120-130				E FP				130-140				E FP				140-150				E FP				150-160			
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.42	1.31	1.43	2.17			40.61	0.45	1.32	1.45	2.21			21.13	0.47	1.40	2.28			17.23	0.43	0.53	1.30	1.52	1.65			30.15
	FP (%)	FP	77.41	4.39	0.96	0.77			83.53	78.17	16.19	0.64	0.53			95.53	86.65	10.00	0.38			97.03	70.99	12.75	5.94	0.84	0.38			90.90
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.48	0.61	0.73	1.47	2.51	21.22	0.45	0.61	0.73	1.33	2.49	25.41	0.46		0.90	1.40	2.79			15.51	0.48	0.60	0.95	1.52				26.39
	FP (%)	FP	91.50	0.96	0.33	2.22	0.48	95.49	76.21	4.66	0.73	11.56	0.41	93.57	87.35		1.88	6.53	1.28			97.04	82.61	9.33	0.58	0.47				92.99
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.88	1.19	1.40	2.31			50.36	1.06	1.32	1.41	2.36		33.97	0.30	1.41	2.36			19.72	0.80	1.42	2.23						30.68
	FP (%)	FP	69.22	2.93	1.67	0.83			74.65	84.33	3.11	0.65	0.37		88.46	87.49	8.51	0.11			96.11	83.62	6.78	0.18						90.58
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.41	0.82	1.31	1.87			18.20	0.45	0.84	1.33	1.69		19.80	0.47	0.77	1.33	1.70			26.70	0.50	0.67	1.47	1.60				23.70
	FP (%)	FP	0.56	95.30	0.43	0.46			96.75	2.40	88.30	5.10	0.25		96.05	2.30	87.40	3.00	0.21			92.91	15.40	78.50	0.33	0.09				94.32

MODELO	PARÁMETROS		VENTANAS en s																											
			160-170				E FP				170-180				E FP				180-190				E FP				190-200			
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.45	1.31	1.56				23.14	0.38	0.47	0.61	1.33	1.42	27.97	0.43	0.54	1.42	1.71	3.19			37.29	0.47	0.65	0.92	1.40			51.44
	FP (%)	FP	84.38	9.97	0.36				94.71	6.60	74.98	4.11	1.66	4.85	92.20	71.83	8.29	5.63	0.54	0.29			86.58	64.47	2.51	1.31	5.23			73.52
1N1GSCC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.54	0.66	0.86	1.60	2.63	28.75	0.57		0.89	1.49	2.52	30.02	0.33	0.48	0.59	1.49			17.04	0.32	0.51	0.69	1.50					39.67
	FP (%)	FP	82.64	2.36	1.68	3.45	1.60	93.73	87.42		0.52	0.83	0.21	88.98	8.19	86.14	1.79	0.98				97.10	9.33	68.70	3.22	3.00				84.25
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.71	1.31	2.30				22.89	0.72	1.49	2.33			31.47	0.88	1.41	2.02			34.78	0.63	1.58	2.29						49.34
	FP (%)	FP	83.74	10.84	0.19				94.77	81.38	8.52	0.19			90.09	82.96	4.17	0.77			87.90	69.03	6.43	0.20						75.66
1N1GACC	FRECUENCIA (Hz)	f, l	0.45	0.56	1.03	1.48	1.56	38.90	0.38	0.55	1.12	1.43	1.65	42.30	0.40	0.52	1.09	1.46	1.57			19.07	0.32	0.50	1.09	1.49	1.62			43.80
	FP (%)	FP	78.10	2.90	0.73	2.40	0.63	84.96	62.00	18.90	0.71	0.40	0.11	82.12	84.50	10.40	0.47	0.95	0.03			96.35	8.90	68.70	1.10	2.00	0.14			80.84

APÉNDICE B

En este apéndice se presentan las comparaciones de las señales medida y calculada para los componentes de Torsión, Traslación y cabeceo. Se eligió el evento 99-1 para ilustrar como están relacionados los ajustes en las respuestas, con el error en la estimación.

En las gráficas, aparece en línea continua la señal medida y en línea punteada la señal calculada con la técnica paramétrica modal.

Los valores en porcentaje que aparecen en la parte superior de las gráficas corresponden a los errores relativos en la estimación para la respuesta en la azotea y en el componente respectivo.

Se recuerdan las expresiones presentadas en el capítulo cuatro, mediante las cuales se calcula el error en la estimación:

El error total correspondiente a J se define como

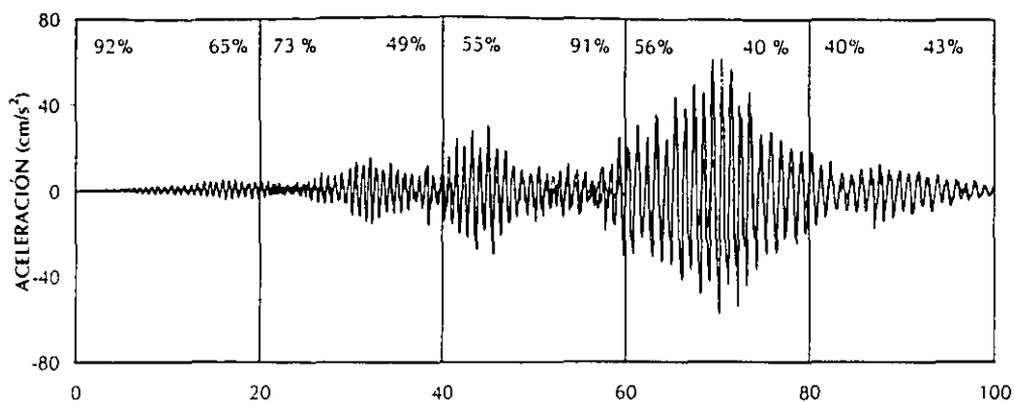
$$E = \frac{\sum_i \sum_s [a_{oi}(s\Delta t) - a_i(s\Delta t)]^2}{\sum_i \sum_s [a_{oi}(s\Delta t)]^2}$$

El error relativo para cada registro de respuesta es

$$E_i = \frac{\sum_s [a_{oi}(s\Delta t) - a_i(s\Delta t)]^2}{\sum_s [a_{oi}(s\Delta t)]^2}$$

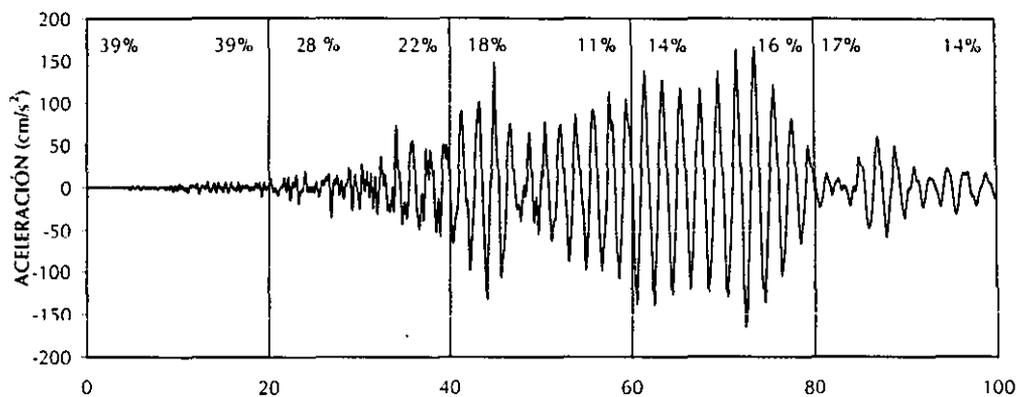
Los índices de error permiten evaluar los resultados obtenidos en la identificación.

TORSIÓN



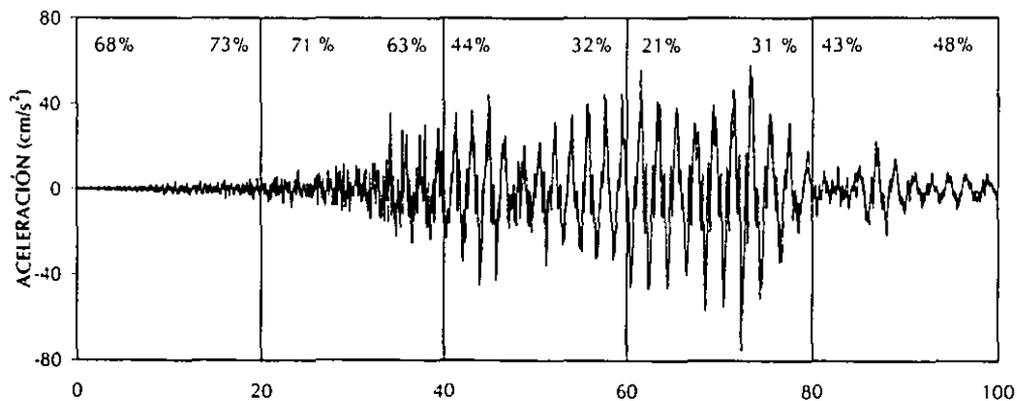
Respuestas de torsión en la azotea con el modelo 3N6GT

TRASLACIÓN



Respuestas de traslación en la azotea con el modelo 3N6GT

CABECEO



Respuestas de cabeceo en la azotea con el modelo 1N1GACC