

01161 (4)



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

T E S I S :
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRO EN INGENIERIA (ESTRUCTURAS)

P R E S E N T A :

ISRAEL CASTELAN LICONA



DIRECTOR DE TESIS: M. EN I. OCTAVIO GARCIA D.

CO-DIRECTOR DE TESIS: Dr. GUSTAVO AYALA M.

CD. UNIVERSITARIA, MÉXICO.

OCTUBRE 2001.

297408



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

**DETERMINACION EXPERIMENTAL
DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO
REFORZADO CON
DISIPADORES DE ENERGÍA**

Esta tesis está dedicada a:

Ana Lilia

Por estar siempre conmigo

Ana Yuleni

Por permitir mostrarle la vida

a mis Padres

Por enseñarme a sobreponerse ante los obstáculos

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

CONTENIDO

1. **INTRODUCCIÓN.**
2. **ANTECEDENTES.**
 - 2.1. Disipadores de Energía.
 - 2.2. Edificios instrumentados.
 - 2.3. Registro de señales de vibración ambiental y forzada en edificios.
3. **DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA.**
 - 3.1. Dispositivos de Control Pasivo.
 - 3.2. Dispositivos de Control Activo.
 - 3.3. Disipadores de Energía.
4. **CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL ANALISIS DE SEÑALES.**
 - 4.1. Características de datos aleatorios.
 - 4.2. Análisis de Fourier.
 - 4.3. Ventanas de atenuación.
 - 4.4. Filtros.
 - 4.5. Propiedades dinámicas
 - 4.5.1. Determinación de frecuencias.
 - 4.5.1. Determinación de formas modales.
 - 4.5.3. Determinación del nivel de amortiguamiento.
5. - **DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO.**
 - 5.1. Sistema estructural.
 - 5.2. Características del reforzamiento.
 - 5.2.1. Descripción del disipador de energía.
6. **INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DEL EDIFICIO.**
 - 6.1. Características del sistema de monitoreo sísmico.
 - 6.2. Registro de señales de vibración ambiental y forzada.

7. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE SEÑALES.

7.1. Procesamiento de señales.

7.2. Análisis de señales.

7.3. Descripción del instrumento virtual para el análisis de señales.

7.3.1. Adquisición de datos.

7.3.2. Análisis y procesamiento de señales.

7.3.3. Graficación de resultados.

8. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL EDIFICIO.

8.1. Señales de Vibración Ambiental.

8.1.1. Evolución de los periodos fundamentales del edificio.

8.1.2. Formas modales antes del refuerzo.

8.1.3. Formas modales después del refuerzo.

8.2. Señales de Vibración Forzada.

8.2.1. Sismo del 15 de junio de 1999.

8.2.2. Sismo del 21 de junio de 1999.

8.2.3. Sismo del 30 de septiembre de 1999.

8.2.4. Sismo del 28 de diciembre de 1999.

8.2.5. Sismo del 21 de Julio del 2000.

8.2.6. Sismo del 7 de Agosto del 2000.

9. ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS.

9.1. Resultados analíticos.

9.2. Comparación de resultados.

10. CONCLUSIONES.

11. RECOMENDACIONES.

REFERENCIAS.

ANEXOS

A1. ESPECTROS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA, DE FASE Y DE COHERENCIA DE SEÑALES DE TIPO AMBIENTAL.

A2. ESPECTROS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA, DE FASE Y DE COHERENCIA DE LOS SISMOS REGISTRADOS EN EL EDIFICIO.

1. INTRODUCCIÓN.

La instrumentación sísmica de estructuras importantes existentes en el Cd. de México que presentaron niveles variables de daño durante el sismo de 1985, ha jugado un papel importante en la búsqueda de una solución racional para su rehabilitación. Esta técnica ha permitido identificar de manera confiable el estado actual en el que se encuentra el sistema estructural de un inmueble, y observar su comportamiento ante diferentes sollicitaciones dinámicas.

La ejecución de este tipo de estudios con fines de evaluación estructural es reciente, no sólo en México, sino también en el resto del mundo. Sin embargo, con ayuda de los desarrollos tecnológicos actuales, el uso de estas técnicas es económicamente posible, representando una opción justificable, particularmente en edificios sobre los que se tenga dudas acerca de su comportamiento sísmico, o bien, en aquellos que han sido reforzados.

Una de las estructuras que resultaron dañadas debido al sismo del 19 de septiembre de 1985, es el edificio de la ex-CONASUPO, ubicado en el poniente de la ciudad de México. Entre los daños más importantes que sufrió este inmueble, se pueden mencionar la pérdida de rigidez lateral debido al deterioro de los sistemas de piso y de los muros longitudinales de concreto reforzado. Esta situación obligó a las autoridades de la ex CONASUPO a tomar medidas para su protección ante eventos sísmicos futuros, por lo que se decidió reforzar la estructura. El refuerzo de la estructura presentó la particularidad del empleo de un disipador de energía desarrollado por ingenieros mexicanos, el cual se describe en el cuerpo de este trabajo.

Como parte de los trabajos de reforzamiento del edificio de la ex-CONASUPO, se instaló un sistema de medición y monitoreo sísmico, formado por cinco acelerómetros instalados en diferentes niveles del edificio. El objetivo principal de este sistema es el registro de eventos sísmicos y señales producto de vibraciones ambientales que proporcionen información sobre el comportamiento global del edificio antes, durante y después del reforzamiento. Así mismo, la información registrada con estos equipos permitirá calibrar los modelos analíticos del edificio, con resultados de mediciones en sitio y en su momento, hacer los ajustes necesarios en el diseño de los nuevos elementos estructurales para garantizar que cumplan con su función ante sollicitaciones sísmicas futuras.

Con base en lo anteriormente expuesto, en este trabajo se presenta el estudio de las señales registradas por el sistema de monitoreo sísmico instalado en el edificio de la ex CONASUPO, que permitió obtener las propiedades dinámicas de la estructura, antes, durante y después del refuerzo propuesto. Para lo cual se desarrolló un instrumento virtual en ambiente LabVIEW (National Instruments 1998), con el que se obtienen los espectros necesarios para realizar el análisis de señales obtenidas experimentalmente. Al respecto, las señales estudiadas fueron producto de la vibración ambiental y de 6 sismos ocurridos durante el desarrollo de este trabajo. Con los resultados obtenidos experimentalmente, fue posible realizar una comparación con los calculados a partir de modelos analíticos.

El contenido de esta tesis se dividió en diez capítulos, los cuales se describen brevemente.

En el capítulo 2 se hace una revisión sobre el uso de los sistemas de disipación sísmica en edificios. Se describe una breve reseña de la instrumentación de edificios. Además se presentan los antecedentes de los estudios realizados para la obtención de propiedades dinámicas de edificios empleando la instrumentación.

En el capítulo 3 se presenta una breve descripción de los mecanismos utilizados en la actualidad para disipar energía en estructuras, entre los cuales destacan los disipadores de energía, que han sido utilizados en algunos edificios en México. Estos dispositivos se han utilizado para mejorar el comportamiento de algunos edificios existentes y para contribuir a la disipación de energía en el caso de edificios nuevos. Se hace una descripción detallada de los sistema de disipadores de energía ya que en el edificio en estudio se utilizó este sistema.

En el capítulo 4 se describen de manera sencilla los conceptos fundamentales del análisis de señales, basados en el conocimiento de la transformada de Fourier.

En el capítulo 5 se discuten las características principales del edificio en estudio, así como su refuerzo. Además se analizan las características del disipador de energía empleado.

En el capítulo 6 se describe el sistema de instrumentación sísmica del edificio, las características específicas de los equipos que lo forman y las propiedades más importantes del registro de señales de origen ambiental o sísmico.

En el capítulo 7 se describe la metodología empleada en el procesamiento y análisis de señales, con ayuda de un instrumento virtual desarrollado en el lenguaje LabVIEW (National Instruments 1998). El instrumento procesa las señales y obtiene los espectros necesarios para la obtención de las propiedades dinámicas del edificio.

En el capítulo 8 se presenta el análisis de las señales producto de vibraciones ambientales y forzadas. Es importante mencionar que los sismos que se presentan en este trabajo ocurrieron después del reforzamiento de la estructura. Para ambos tipos de señales se obtienen frecuencias y formas modales, así como el porcentaje de amortiguamiento crítico de la estructura.

En el capítulo 9 se presentan los resultados obtenidos del análisis de las señales descritas en el capítulo 8 y se comparan con los resultados analíticos de la estructura antes y después del reforzamiento. Se discuten las diferencias encontradas entre los resultados obtenidos considerando las distintas fuentes de excitación y las existentes con el modelo analítico.

En el capítulo 10 se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo desarrollado y se hacen algunas recomendaciones para estudios similares.

2. ANTECEDENTES

En este capítulo se hace una revisión de algunos estudios realizados en México sobre el empleo de sistemas de disipación de energía en edificios, para mejorar su comportamiento ante eventos sísmicos. Además se presentan algunos antecedentes de la técnica de instrumentación sísmica en edificios como herramienta para obtener sus propiedades dinámicas. Se mencionan las técnicas aplicadas a la instrumentación sísmica, como son la vibración ambiental y la vibración forzada, ya sea por eventos sísmicos o provocada artificialmente.

2.1. Disipadores de Energía.

Después del evento sísmico ocurrido en la ciudad de México el 19 de septiembre de 1985, se emitieron un conjunto de normas de emergencia para revisar las estructuras dañadas por este evento. En 1987 se publicaron un nuevo reglamento para el Distrito Federal y sus normas técnicas complementarias. En esta nueva reglamentación se emitieron importantes recomendaciones, entre las que se pueden destacar la modificación de las ordenadas máximas de aceleración empleadas en la construcción de los espectros de diseño para los tipos de suelos existentes en el valle de México y la reducción del factor de comportamiento sísmico Q . Con este nuevo marco de referencia, fue necesario evaluar la seguridad estructural de las edificaciones importantes y de no cumplir los nuevos requerimientos, proceder a su reforzamiento. A raíz de lo anterior se despertó el interés por encontrar diferentes opciones para el reforzamiento de estructuras dañadas y o para proteger estructuras nuevas.

El comportamiento estructural de los edificios ante un evento sísmico, puede tener las siguientes características:

- La estructura se comporta dentro del rango lineal, lo cual ocurre para sismos de intensidad moderada.
- Algunos de los elementos estructurales incursionan en el rango no lineal, por lo cual la estructura recurre a su capacidad dúctil, con presencia de daño en función de la intensidad sísmica.

Una técnica alterna y relativamente reciente comparada con los métodos convencionales de refuerzo, ha sido el uso de dispositivos disipadores de energía, los cuales permiten canalizar gran parte de la energía que produciría daño en la estructura, a dispositivos desarrollados para tal propósito y localizados en zonas previamente definidas.

A nivel nacional se han realizado diversos estudios sobre dispositivos disipadores de energía, Aguirre y Sánchez (1990), Martínez (1990), Silva y Ruiz (1994), entre otros. Particularmente, Montiel y Silva (1998), han observado que al utilizar disipadores de energía y diagonales metálicas en edificios altos, estructurados a base de marcos dúctiles, se pueden reducir las distorsiones de entrepiso y los desplazamientos laterales, con respecto a la misma estructura colocándo únicamente contraventeo.

También se ha mostrado que bajo ciertas características estructurales, los edificios altos con disipadores permiten reducciones importantes en la respuesta y daño estructural que ocasionan los eventos sísmicos característicos de la Cd. de México. Además se ha mostrado que cuando

edificios altos esqueléticos cuentan con disipadores, estos elementos, sin ser propios de la estructura, son los únicos que sufren deformaciones inelásticas, ya que no se registran articulaciones plásticas en traveses y columnas (Silva y Ruiz 1994).

En términos generales, los disipadores de energía proveen un incremento en los niveles de seguridad estructural ante sismos intensos del edificio donde se colocan, provocando que los elementos no estructurales sufran poco o ningún daño, sin embargo, se incrementa el costo inicial del edificio, por lo cual deberá ser analizada la conveniencia de su empleo en diferentes sistemas estructurales.

2.2. Edificios instrumentados.

La instrumentación sísmica en edificios a nivel mundial, a excepción de las grandes potencias económicas, Estados Unidos y Japón, es muy pobre. En el caso de nuestro país, es en 1950 cuando se realizan los primeros trabajos mediante la colocación de transductores de desplazamiento y acelerógrafos en la torre Latinoamericana. Los registros sísmicos obtenidos con estos instrumentos, se tomaron como referencia para definir los coeficientes sísmicos de la norma de diseño vigente en ese entonces. Desafortunadamente, por diversas circunstancias, no fue posible llevar a cabo más estudios de este tipo, de tal suerte que cuando ocurrió el sismo de 1985 no hubo ningún edificio instrumentado en el país, con lo cual se perdió una valiosa oportunidad para conocer el comportamiento de estructuras que sufrieron diferentes niveles de daño o hasta colapso.

A partir de 1985 se impulsa fuertemente una serie de estudios para conocer la respuesta sísmica en edificios instrumentados, donde diversos centros de investigación e instituciones incursionan en este campo de conocimiento. Para 1995 existían ya 30 edificios instrumentados en todo el país. Actualmente, algunos investigadores han empleado esta técnica para determinar las propiedades dinámicas de los edificios, calibrar modelos analíticos y para comparar los resultados de vibración ambiental y sísmica, a fin de ampliar el conocimiento del comportamiento dinámico de edificios con fines ingenieriles.

2.3. Registro de señales de vibración ambiental y forzada en edificios.

Las estructuras instrumentadas pueden registrar los eventos sísmicos a los que se expongan, con lo que se obtiene valiosa información para conocer sus propiedades dinámicas. Estas excitaciones provocan grandes esfuerzos en los elementos de la estructura, con lo es posible evaluar su capacidad resistente ante eventos sísmicos de modo directo, y en su caso modificar su estructuración.

Sin embargo, cuando no se han registrado sismos en los sistemas de instrumentación, existen otras técnicas con las que es posible estimar las propiedades de la estructura y predecir su comportamiento frente a grandes sollicitaciones, como son los sismos.

Una de estas técnicas es la llamada de vibración ambiental, que consiste en el registro de pequeños movimientos provocados por el paso de vehículos, acción de motores, movimiento de cargas vivas, etc.; utilizando espectros de potencia y funciones de transferencia además de los espectros de Fourier, empleando ventanas de observación en el dominio de la frecuencia. Con

esta herramienta podemos conocer algunas de las propiedades dinámicas de las estructuras, sin embargo, se ha visto que los resultados obtenidos a partir de este tipo de mediciones pueden tener variaciones importantes, comparados con los resultados de excitaciones sísmicas, por ejemplo, para Muna y Gonzalez (1995) estas diferencias son del orden de 20 %. Este hecho se atribuye al nivel de deformación que experimentan las estructuras en uno u otro caso.

Existen otras técnicas, como la llamada vibración forzada producida artificialmente por el hombre, en donde se logra la excitación del edificio con la ayuda de masas excéntricas oscilando con ayuda de motores.

En este trabajo se presentan excitaciones ambientales y sísmicas, con las que fue posible encontrar las propiedades dinámicas de la estructura, y comparar los valores obtenidos por estos dos medios con los resultados de un análisis matemático convencional.

3. DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA.

Los niveles de daño que provoca un sismo de gran intensidad en una estructura, dependen de la capacidad que esta posea para absorber la energía. En edificios altos a base de marcos, la estructura es capaz de absorber la energía a través de la ductilidad del sistema. Existirá sin embargo, un costo de reparación de los elementos que sufran daño considerable ante algún evento extraordinario. Por esta razón se ha propuesto el uso de dispositivos externos a la estructura que permitan reducir de manera apreciable la respuesta sísmica, sin depender de la ductilidad propia del edificio, reduciendo los daños de la estructura. Se busca entonces que la energía sísmica se disipe mediante el trabajo mecánico de estos dispositivos y no por medio del comportamiento dúctil de los elementos estructurales.

Aunque el costo de reparación en edificios con disipadores de energía, debido al daño en elementos estructurales es mínimo o nulo para sismos de mediana intensidad, deberá hacerse una inversión inicial importante al colocar estos dispositivos en la estructura. Una inversión adicional que deberá considerarse como parte de un programa de mantenimiento, es la sustitución de algún dispositivo que haya sufrido deterioro en sus propiedades mecánicas, por efecto de un evento sísmico intenso.

Actualmente existen diferentes dispositivos disipadores de energía, sin embargo, en términos generales estos se dividen en dos grupos: dispositivos de control pasivo y dispositivos de control activo. Los materiales más utilizados en la fabricación de estos dispositivos son: placas de acero o aleaciones, núcleos de plomo, elastómeros, compuestos viscoelásticos, etc. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de ellos.

3.1. Dispositivos de Control Pasivo.

Esta clase de dispositivos controla los daños mediante la absorción de energía sísmica empleando elementos que modifican las propiedades dinámicas elásticas o inelásticas de la estructura, según se requiera. Dentro de esta clasificación existen los siguientes tipos:

- Disipadores de energía
- Aisladores de base
- Osciladores resonantes
- Cables de preesfuerzo

Los disipadores de energía son dispositivos colocados generalmente en contraventeos, que absorben la energía sísmica de acuerdo al desplazamiento relativo de los entresijos, fig 3.1a. Estos dispositivos pueden disipar la energía a través de su comportamiento elastoplástico, por estrusión, fricción o por medio de comportamiento viscoelástico.

Los aisladores de base son elementos, colocados generalmente entre la cimentación y la superestructura, con la finalidad de aislarla de los movimientos horizontales del terreno. Son sistemas flexibles lateralmente, los cuales pueden consistir en una serie de placas de hule y de acero intercaladas, fig 3.1b. Este tipo de sistemas provocan que el periodo fundamental de vibración sea más largo, por lo que son utilizados en sitios donde el movimiento sísmico es

dominado por las frecuencias altas. Los aisladores de base actualmente se han empleado más frecuentemente en puentes, aunque también se utilizan en edificios.

Los osciladores resonantes son masas adicionales a edificios, colocadas sobre el último nivel, que modifican las propiedades dinámicas de la estructura, reduciendo su respuesta ante eventos sísmicos. Los desplazamientos del edificio pueden ser reducidos de forma importante si se eligen adecuadamente las propiedades dinámicas de la masa adicional. Son llamados resonantes debido a que su base teórica supone que los periodos entre la masa adicional y la excitación sean coincidentes, con lo que la estructura principal sufriría desplazamientos pequeños (Ancira, 1982).

Otro sistema utilizado para disipar energía, consiste en colocar cables de presfuerzo sujetos a las columnas del edificio, lo que incrementa su rigidez lateral. Sin embargo se debe tener presente el incremento en la carga axial de las columnas.

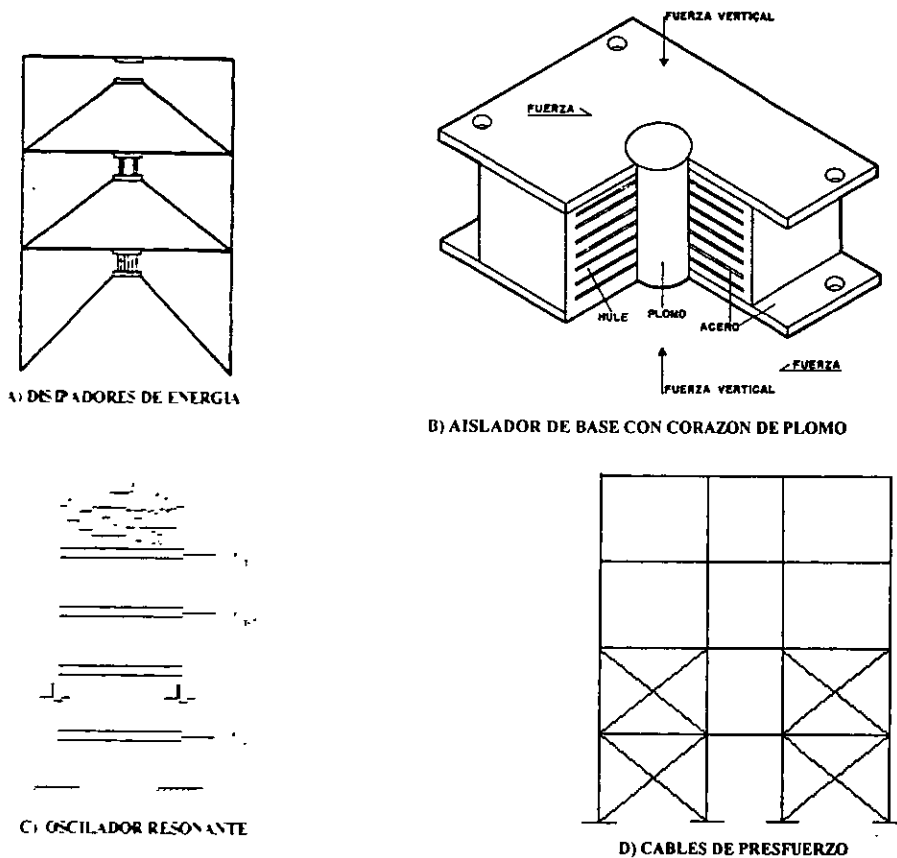


Figura 3.1. Dispositivos de control pasivo.

3.2. Dispositivos de Control Activo.

Estos dispositivos son mecanismos inteligentes que controlan los efectos sísmicos y el daño potencial, reduciendo las vibraciones mediante la aplicación de fuerzas externas. El sistema de fuerzas (actuadores) está controlado por una computadora, que recibe la señal enviada por un sensor de movimiento colocado en la estructura (sistema sensor-computadora de control-actuador). Algunos de los sistemas de este tipo, (Jara, 1991) son:

- Masa Activa.
- Tendones Activos.
- Dispositivo de Fricción Activo.
- Apéndices Aerodinámicos.

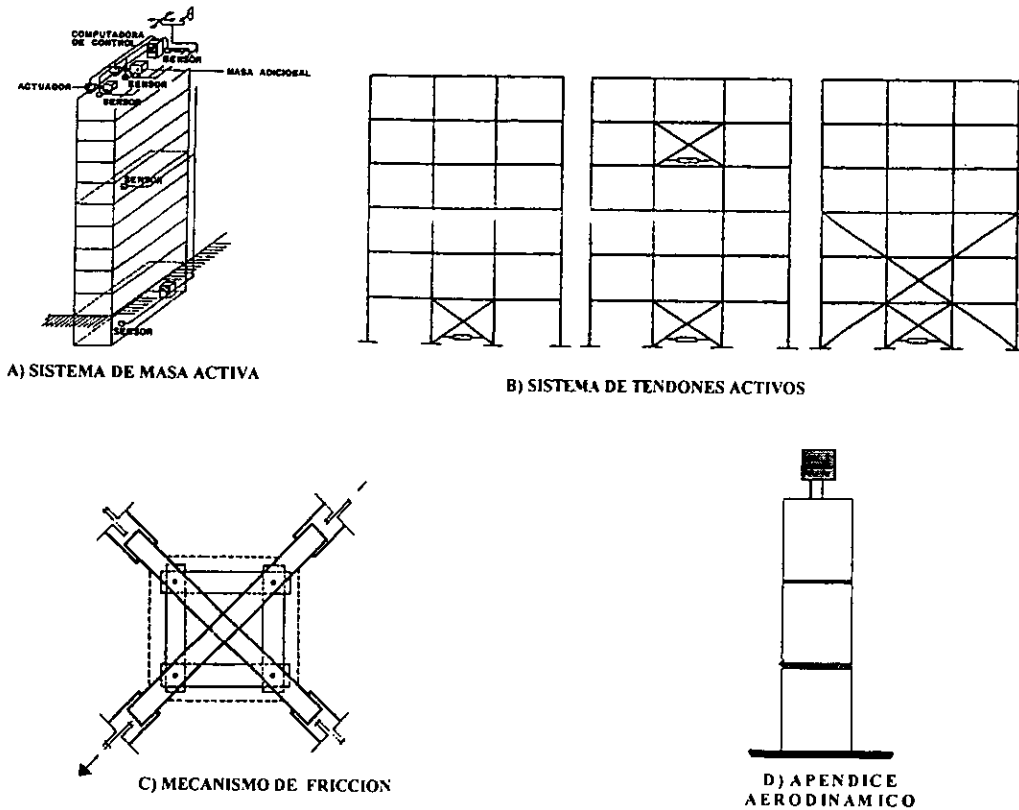


Figura 3.2. Dispositivos de control activo.

El sistema de masa activa trabaja mediante un sistema de actuadores controlados por computadora, que reciben la señal del movimiento de la estructura. Por las características de este mecanismo, las fuerzas son aplicadas en el último nivel del edificio, fig 3.2.a.

Los tendones activos son contraventeos colocados diagonalmente, abarcando uno o varios niveles de la estructura. Este sistema permite controlar los desplazamientos laterales mediante la aplicación de fuerzas a los tendones en función de las señales que recibe la computadora, fig 3.2.b.

Los dispositivos de fricción activa son elementos colocados generalmente en contraventeos, los cuales utilizan la fuerza de fricción para disipar energía. Los actuadores aplican la fuerza cuando se rebasa un umbral de deslizamiento en los dispositivos.

Los apéndices aerodinámicos funcionan controlando la posición de un apéndice colocado en el último nivel de la estructura mediante un sistema de sensores controlados por computadora, con lo que se producen fuerzas al actuar el viento sobre el apéndice, y éste oponerse al movimiento.

Debido a que en el presente trabajo se estudia un edificio reforzado con diagonales metálicas y disipadores de energía, a continuación se presenta una revisión más detallada de este tipo de dispositivos.

3.3. Disipadores de Energía

Como se mencionó anteriormente, estos dispositivos se ubican generalmente en los contraventeos y tienen como objetivo principal disminuir los efectos sísmicos en la estructura, mediante la disipación de energía. Estos elementos también han sido usados entre la cimentación y la estructura, en combinación con aisladores de base. De acuerdo con la manera en que disipan la energía se pueden agrupar en:

- Comportamiento elastoplástico.
- Por extrusión.
- Por fricción.
- Comportamiento viscoelástico.

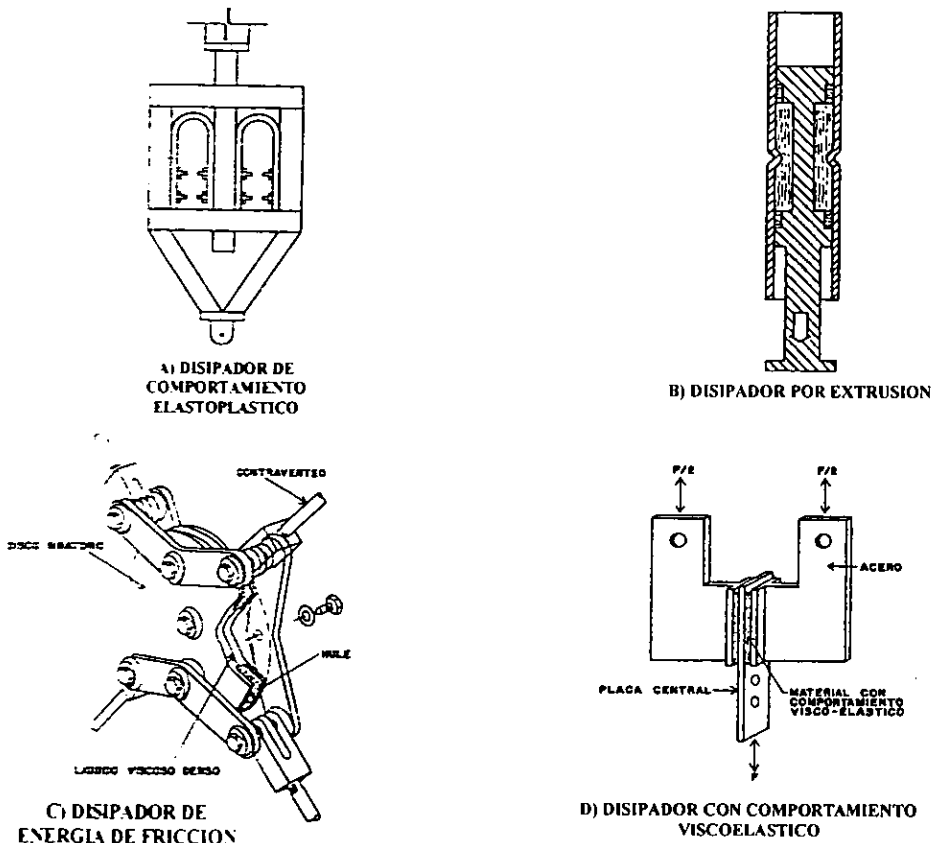


Figura 3.3. Tipos de disipadores de energía.

Los disipadores que tienen comportamiento elastoplástico tendrán mayor disipación de energía conforme se incremente el área bajo la curva esfuerzo-deformación. Se han fabricado dispositivos que trabajan a flexión, como los llamados ADAS, fig 3.4a, (Alonso 1989, Whittaker y col. 1989,

etc.), a flexión en cantiliver (Skinner , Kelly y Heine 1975) fig 3.4b y a torsión (Skinner y Mcverry 1975).

Los disipadores por extrusión disipan la energía al deformar un elemento compresible en un cuerpo que lo contiene (Robinson y Greenbank 1975). El material compresible que se utilizado es plomo, el cual posteriormente se recristaliza y recupera sus propiedades, fig 3.3b.

Los disipadores por fricción (Pall y Marsh 1982) se colocan en el cruce de los contraventeos y trabajan al desplazarse una diagonal respecto a la otra. Estos dispositivos se diseñan para permitir cierto deslizamiento ante cargas de servicio y para disipar energía por fricción cuando se rebasa cierto umbral. Fig 3.3.c.

Los disipadores con comportamiento viscoelástico, fig 3.3.d, suelen colocarse en contraventeos. La disipación de energía en estos elementos se obtiene con un material viscoelástico que une las piezas cuando experimentan un movimiento relativo entre si (Lin 1988). Se han observado variaciones en el amortiguamiento y en la reducción de la respuesta de la estructura en función de la temperatura.

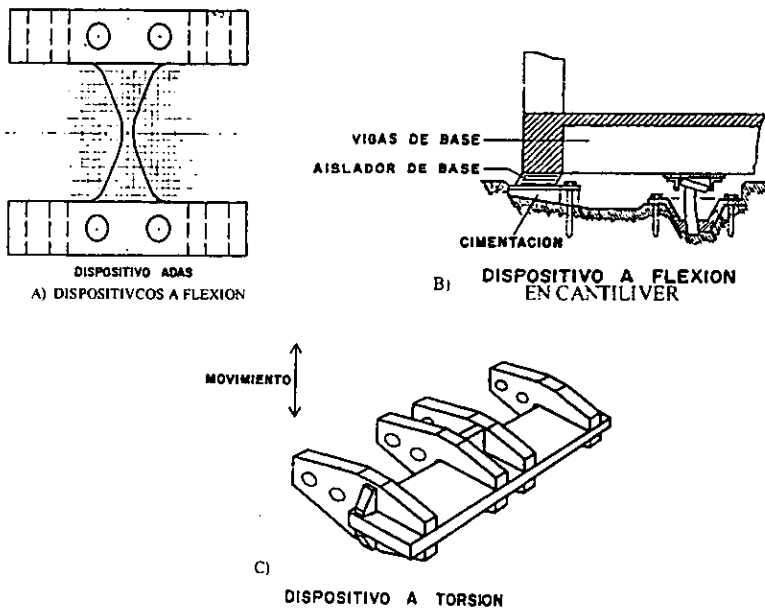


Figura 3.4. Algunos tipos de disipadores de energía elastoplásticos.

El dispositivo utilizado en el edificio de la ex CONASUPO es un disipador de energía de comportamiento elastoplástico, concebido por el Ing. Jorge Ortega Beltrán y finalmente implementado por los ingenieros Jaime Antoniano y Raúl Jean. El principio en el cual se basa el disipador es el modelo de una viga simplemente apoyada sobre la cual se aplican dos cargas puntuales de igual magnitud y equidistantes de sus extremos. Este dispositivo se describe de manera detallada en el capítulo 5.

4. ANALISIS DE SEÑALES

4.1. Características de datos aleatorios.

Para la utilización de técnicas de procesamiento y análisis de señales es indispensable conocer el tipo de datos con que se cuenta e identificar sus características principales.

Todo fenómeno físico puede ser descrito mediante una serie de datos, los cuales se miden normalmente en términos de una amplitud versus tiempo. Los valores de amplitud que se registran, representan alguna cantidad física de interés ingenieril, como puede ser la velocidad, aceleración, temperatura, etc. Al conjunto de esta serie de datos se le conoce como un *registro de datos*. En términos generales, los datos pueden ser de naturaleza determinista o aleatoria.

Los *datos deterministas* son aquellos que pueden describir un fenómeno físico de manera razonable por medio de una relación matemática explícita, como por ejemplo, el movimiento de un satélite en órbita alrededor de la tierra, o la oscilación de un cuerpo rígido sujeto a un resorte con comportamiento lineal.

Los *datos aleatorios* (no-deterministas) representan al fenómeno físico observado y pueden ser descritos empleando postulados probabilísticos y promedios estadísticos debido a que cada una de las observaciones del fenómeno es única. Como ejemplo de datos aleatorios se pueden mencionar las aceleraciones sísmicas y de vibración ambiental, los cambios de temperatura durante el día, la fuerza del viento, etc.

A la historia de datos aleatorios registrados durante el tiempo en el que ocurre el fenómeno físico, se le llama *función de muestra o registro de historia en el tiempo*. La colección de todas las funciones de muestra que pudieron haber ocurrido forman un *proceso aleatorio* o *proceso estocástico*.

En procesos aleatorios, si todas las propiedades promedio (valor medio, valor medio cuadrático, función de autocorrelación, y otras funciones de orden superior) de un ensamble de registros de historia en el tiempo permanecen constantes para cualquier instante en el tiempo, se dice que corresponden a un proceso de datos *estacionarios*. En caso contrario se les llama datos *no-estacionarios*. En las ecs 4.1 a 4.3 se presentan las expresiones para calcular en un tiempo t_1 , el valor medio, el valor medio cuadrático y la función de autocorrelación de un ensamble de registros de historia en el tiempo $\{x(t)\}$, ver fig 4.1.

$$\mu_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t_1) \quad (4.1)$$

$$\phi^2_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2(t_1) \quad (4.2)$$

$$R_x(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t_1) x_i(t_1 + \tau) \quad (4.3)$$

Si las propiedades promedio obtenidas de un ensamble de registros en el tiempo t_1 son iguales a las obtenidas a partir de un registro individual, se dice que los datos son *ergódicos*. Por ejemplo, para un ensamble de registros $\{x(t)\}$ cuyos datos son estacionarios y ergódicos, el valor promedio $\mu_x(k)$ y la función de autocorrelación $R_x(\tau, k)$ no difieren cuando se calculan para registros individuales. de modo que $\mu_x(k) = \mu_x$ y $R_x(\tau, k) = R_x(\tau)$. Consecuentemente, en un proceso estacionario y ergódico es suficiente con estudiar un solo registro para obtener sus propiedades. Esta es una de las simplificaciones comúnmente utilizadas en el análisis de señales estructurales.

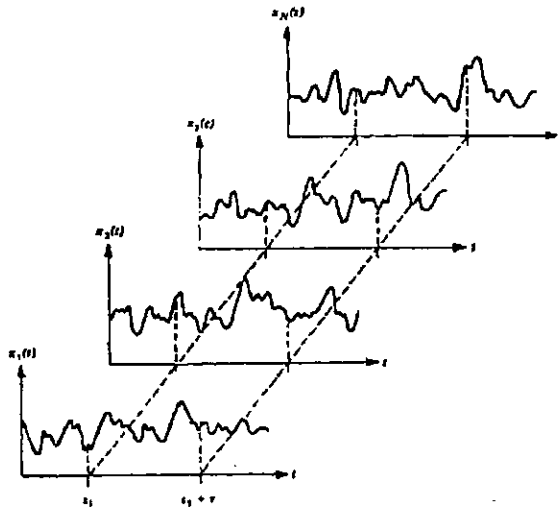


Figura 4.1 Ensamble de registros con historia en el tiempo que definen un proceso aleatorio.

4.2. Análisis de Fourier.

Para obtener las propiedades dinámicas de una estructura, es común llevar a cabo el muestreo de la señal tomando como parámetro base la aceleración registrada mediante el uso de acelerómetros. Con esta información se obtiene la representación de la señal en el *dominio del tiempo*, sin embargo, para el análisis de señales es necesario conocer el contenido de frecuencias de una señal, más que las amplitudes de cada muestra individual. Por lo tanto es de mayor utilidad obtener la representación de una señal en el dominio de la frecuencia. El algoritmo que se usa para transformar las muestras a partir de datos en el dominio del tiempo al dominio de las frecuencias se conoce como transformada de Fourier, ec 4.3..

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.3)$$

en donde j es el número imaginario $\sqrt{-1}$, f es la frecuencia circular, t es el tiempo, $x(t)$ es una señal dada y $X(f)$ es su transformada de Fourier

Para el caso de señales con un número finito de datos, se emplea la formulación matemática de la transformada discreta de Fourier (DFT), la cual está dada por la ec 4.4.

$$X_k = \sum_{l=0}^{N-1} x_l e^{-j2\pi k l / N} \quad (4.4)$$

para $k=0, 1, 2, 3, \dots, N-1$

En mediciones de sistemas estructurales, la señal $x(t)$ se obtiene a través de un instrumento analógico-digital. por lo que la representación de la transformada de Fourier se realiza en forma discreta. en un lapso de tiempo T .

El proceso numérico involucrado en la obtención de la transformada discreta de Fourier (DFT), es laborioso. ya que requiere del cálculo de N^2 operaciones complejas aproximadamente. Sin embargo, existe una simplificación importante cuando el número de datos N contenidos en la señal es una potencia de 2. es decir, $N=2^k$, para $k=1, 2, 3, \dots, etc$. Para este caso especial, el cálculo de la DFT se puede obtener en aproximadamente $N \log_2(N)$ operaciones. En caso de que el número de datos contenidos en un registro sea diferente de una potencia de 2, es recomendable agregar al final de la señal. datos adicionales con un valor nulo, para alcanzar este objetivo. Esta adición de ceros en el registro no tiene ningún impacto en el cálculo del espectro. En procesamiento digital de señales se conoce a este caso particular como la transformada rápida de Fourier (FFT).

Para obtener resultados confiables en el cálculo de los espectros de Fourier, es importante tener presente algunas recomendaciones relativas al muestreo de la señal, en la obtención de la transformada discreta de Fourier. Si se considera al intervalo de tiempo entre muestras como Δt , y a la razón de muestreo como f_s , la relación entre el número total de muestras N (ya sea en el dominio del tiempo o frecuencia) y el intervalo de frecuencia entre muestras Δf , se define por las siguientes expresiones:

$$\Delta t = \frac{T}{N} = \frac{1}{f_s} \quad f_s = \frac{1}{\Delta t} \quad \Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{1}{T} \quad (4.5)$$

donde T es tamaño del registro en segundos.

Se han sugerido la obtención de frecuencias y modos de vibrar realizando promedios para obtener valores más confiables. Por ejemplo Muriá y González (1995) utilizaron valores de 10 ó mayores, para la relación entre la menor frecuencia esperada de la estructura y la resolución de frecuencia, es decir, $f/\Delta f > 10$, además sugieren realizar promedios mayores a 12 eventos, con una duración mínima por evento equivalente a 20 veces el mayor periodo fundamental de la estructura. Con base en esto, el número mínimo de muestras N que deberá contener un registro para obtener una resolución de frecuencia mucho más confiable, está dado por la ec 4.6. y se grafica en la fig 4.2.

$$\frac{f}{\Delta f} = \frac{f}{1/N\Delta t} = fN\Delta t \geq 10 \quad \text{por lo tanto} \quad N \geq \frac{10}{f\Delta t} \quad (4.6)$$

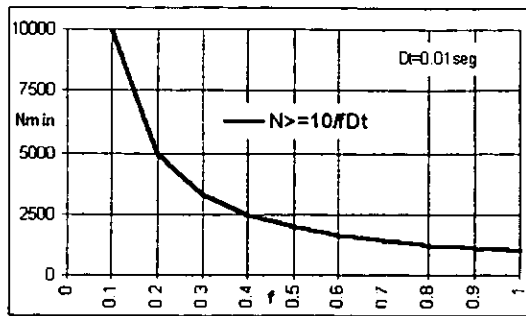


Figura 4.2. Número de muestras mínimas respecto a f para el cálculo de espectros con una adecuada resolución.

De acuerdo a esta figura, para el cálculo de los periodos y las formas modales del edificio en estudio, el número mínimo de muestras depende del valor de frecuencia del sistema, en el capítulo 8 se encuentra esta cantidad aproximada de muestras requeridas para el análisis.

Amplitud y fase

Por la forma de la integral que define la transformada de Fourier, ec 4.1, se observa que independientemente de que la señal de entrada $x[i]$ sea real o compleja, la transformada de Fourier $X[k]$ es siempre compleja. Con base en esto se puede obtener 2 tipos de información: la *amplitud* y la *fase*. En análisis de señales se dice que el espectro de amplitud es una función de simetría par y el espectro de fase de simetría impar, fig 4.3.

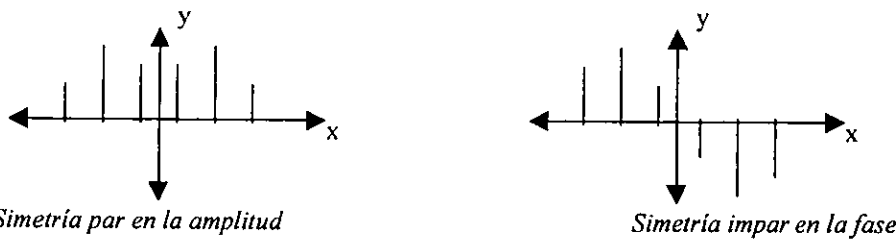


Figura 4.3 Descripción de la simetría par e impar en la amplitud y fase respecto al eje Y.

Es decir

$$|X[k]| = |X[N - k]| \quad \text{y} \quad \text{fase}(X[k]) = -\text{fase}(X[N - k]) \quad (4.7)$$

donde:

$X[k]$ = valor de la transformada de Fourier en la muestra k .
 N = número total de muestras.

El espectro de amplitud nos permite observar cuales son las frecuencias más importantes que se encuentran presentes en la señal y por lo tanto el rango de frecuencias en el que concentra la mayor parte de la energía. Por otro lado, el espectro de fase nos indica el tiempo de retraso respecto al origen, que tienen cada una de las funciones armónicas que forman la señal. Para una señal dada, el espectro de fase sirve para determinar la dirección del movimiento de un

instrumento respecto a la de otro. Por ejemplo, si se tienen instrumentos orientados paralelamente, estarán en fase (ángulo de fase = 0°), en caso contrario estarán fuera de fase (ángulo de fase = 180°).

Espectro de Potencia.

El espectro de potencia de una función de $x(t)$, definido de acuerdo a la ec 4.8. Se obtiene al graficar el contenido de potencia en función de su frecuencia. El contenido de potencia nos indica la cantidad de energía que se libera en determinada frecuencia. Se puede demostrar que el contenido de potencia es el cuadrado de la amplitud del espectro de Fourier, siendo siempre una función real. Una desventaja de esta representación es la pérdida de la información de la fase.

$$S_{xx}(f) = X^*(f)X(f) = |X(f)|^2 \quad (4.8)$$

En donde $X(f)$ es la transformada de Fourier de la señal $x(t)$ y $X^*(f)$ es el conjugado complejo de $X(f)$.

El espectro de potencia es útil para determinar las frecuencias de resonancia así como el coeficiente de amortiguamiento, ya que los picos máximos están más definidos que en la función de transferencia.

Función de transferencia

Las relaciones dinámicas entre las señales de entrada y salida de la excitación, se pueden establecer a través de la función de transferencia $H(f)$, de acuerdo a la siguiente relación:

$$Y(f) = H(f)X(f) \quad (4.9)$$

donde $Y(f)$ y $X(f)$ son las transformadas de Fourier de las señales de salida y entrada respectivamente. El conjugado complejo de esta ecuación es:

$$Y^*(f) = H^*(f)X^*(f) \quad (4.10)$$

multiplicando 4.9 por 4.10 nos queda:

$$Y^*(f)Y(f) = H^*(f)H(f)X^*(f)X(f) = |Y(f)|^2 = |H(f)|^2|X(f)|^2 \quad (4.11)$$

considerando la ec 4.8, finalmente nos queda:

$$S_{yy}(f) = |H(f)|^2 S_{xx}(f) \rightarrow |H(f)|^2 = \frac{S_{yy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (4.12)$$

A la función de transferencia $H(f)$ también se le conoce en ingeniería como función de respuesta de frecuencias, ya que para estructuras ligeramente amortiguadas, mostrará máximos en aquellas frecuencias donde exista una respuesta máxima.

Por otro lado si a la ec 4.9 la multiplicamos por X^* , nos queda:

$$X^*(f)Y(f) = H(f)X^*(f)X(f) = H(f)|X(f)|^2 \quad (4.13)$$

considerando la ec 4.8 y sabiendo además que $S_{XY}(f) = X^*(f) Y(f)$ es el espectro cruzado de las funciones de entrada y salida, entonces

$$S_{XY}(f) = H(f)S_{XX}(f) \rightarrow H(f) = \frac{S_{XY}(f)}{S_{XX}(f)} \quad (4.14)$$

Mediante la función de transferencia definida en función del espectro cruzado, entre las señales de entrada y salida, y del espectro de potencia de la señal de entrada (ec 4.14), se puede obtener información relacionada con el factor de ganancia y con el factor de fase. Con el factor de ganancia $|H(f)|$ (ver la ec 4.12) definido como la parte real de la función de transferencia, es posible relacionar la amplitud de la señal de entrada con la de salida. El factor de fase de la función de transferencia representa la fase de la señal de salida relativa a la señal de entrada para cualquier frecuencia dada.

Para el caso de sistemas físicos ideales (sistemas físicos estables, reales, lineales, y que tengan parámetros constantes) la función de transferencia permite describir sus características dinámicas, aunque en mediciones experimentales normalmente pueden existir complicaciones en el cálculo de $H(f)$, debido a la presencia de ruido.

Función de coherencia.

Otro de los parámetros importantes dentro de las mediciones en un sistema, es la función de coherencia $\gamma^2(f)$, que tiene la característica de ser adimensional en el dominio de la frecuencia y presenta valores entre cero y uno. Los valores de coherencia representan la fracción de la salida del sistema que se relaciona directamente con la entrada, y proporciona un indicador de la validez de la función de transferencia estimada. Matemáticamente, la coherencia es una función de correlación cruzada en el dominio de las frecuencias, la cual se puede obtener a partir de la ec 4.15.

$$\gamma^2(f) = \frac{|S_{XY}(f)|^2}{S_{XX}(f)S_{YY}(f)} \quad (4.15)$$

Para llevar a cabo una identificación confiable de las frecuencias naturales de vibrar de una estructura, no basta con analizar exclusivamente los espectros de Fourier y de potencia, ya que podrían cometerse errores debido a la presencia de otras ordenadas espectrales que pueden ser significativas pero, ajenas a las frecuencias naturales del edificio; este es el caso de las ordenadas asociadas a vibraciones de estructuras vecinas y de equipo electromecánico. Debido a este hecho

es importante complementar el estudio de los espectros de Fourier con el análisis de las funciones de transferencia y de coherencia. Adicionalmente, la coherencia se emplea para calcular las formas modales: al respecto, si para una frecuencia dada se tienen valores bajos de coherencia, indica que uno o más de los espectros estimados contienen niveles importantes de ruido externo, con lo que se podría sobrestimar severamente la deflexión modal relativa.

Cuando la coherencia es mayor a cero e inferior a uno, existe una o mas de las siguientes condiciones:

1. Hay ruido externo en las señales.
2. Se presenta un error de sesgo en la resolución del espectro.
3. La relación entre las señales de entrada $x(t)$ y salida $y(t)$ del sistema, es no lineal.
4. La señal de salida $y(t)$ es debe a otros impulsos además de la señal de entrada $x(t)$.

4.3. Ventanas de atenuación.

El teorema de muestreo establece que se puede construir una señal continua en el tiempo a partir de muestras discretas e igualmente espaciadas, si la frecuencia de muestreo es al menos dos veces la frecuencia más alta de la señal de tiempo. Así mismo, se asume que la señal puede ser muestreada a intervalos Δt igualmente espaciados, sin pérdida de información. De este modo, la frecuencia de muestreo f_s se obtiene como el inverso del intervalo de muestreo, ec 4.16.

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \quad (4.16)$$

De acuerdo al teorema de muestreo, la más alta frecuencia que el sistema digital puede procesar es conocida como la frecuencia de Nyquist, ec 4.17.

$$f_{Nyq} = \frac{f_s}{2} \quad (4.17)$$

La obtención del espectro de Fourier mediante las transformadas discreta y rápida de Fourier, asume que existe una señal continua en el tiempo, la cual está formada por una serie de ondas de periodo T constante. En casos prácticos, donde las señales son discretas (señales de vibración ambiental o de vibración forzada) la onda de periodo T corresponde a la señal registrada. Sin embargo, aunque se tomen en cuenta rigurosamente las condiciones de muestreo, la señal registrada puede tener diferentes características espectrales respecto a la señal continua supuesta. Lo anterior se produciría si la señal registrada tiene una forma de onda truncada, equivalente a una discontinuidad en la señal periódica, fig 4.4. Estas discontinuidades producen distorsiones en los espectros calculados respecto a los que se obtendrían de la función continua. La pérdida de información producida por este efecto, es conocida como fuga espectral,

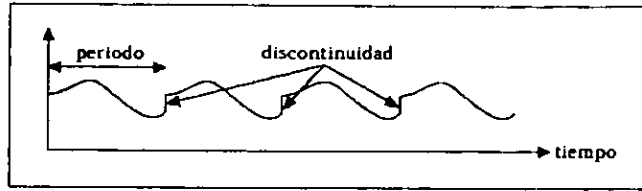


Fig 4.4 Onda troncada

Es claro que para eliminar la fuga espectral, la señal registrada tendría que ser de longitud infinita, lo que es imposible de lograr en la práctica. Sin embargo, se puede disminuir la fuga espectral en señales de tiempo finito mediante el uso de ventanas de atenuación, que reducen la magnitud de la discontinuidad en los límites de cada periodo. Además de esto, las ventanas de atenuación permiten estudiar uno o varios segmentos de la señal registrada y se pueden detectar dos frecuencia muy cercanas entre sí cuyas amplitudes puede ser muy diferentes, fig 4.5.

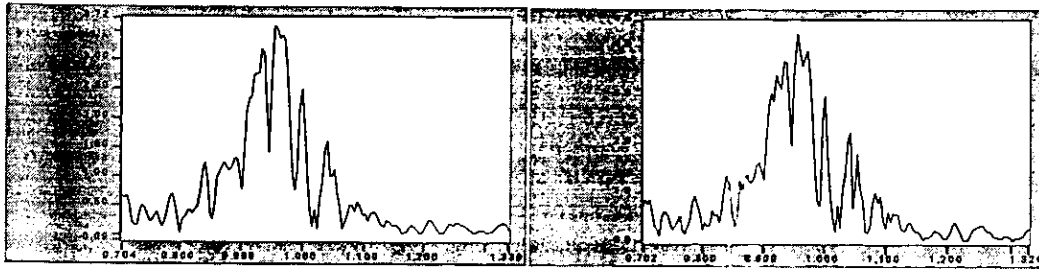


Figura 4.5. Espectro de Fourier con y sin ventana de atenuación (Hanning).

La aplicación de una ventana de atenuación a una señal en el dominio del tiempo, es la multiplicación de la señal por la función matemática que define a la ventana. Debido a que una multiplicación en el dominio del tiempo es equivalente a una convolución en el dominio de la frecuencia, el espectro de la señal obtenido con una ventana de atenuación, es una convolución del espectro de la señal original con el espectro de la ventana. En resumen, al aplicar una ventana de atenuación cambia la forma de la señal en el dominio del tiempo y afecta al espectro correspondiente.

En el análisis de señales existen varios tipos de ventanas de atenuación, entre las que se puede mencionar la ventana rectangular, ventana Hanning, ventana Hamming, entre otras.

La ventana rectangular tiene amplitud unitaria en el tiempo, fig 4.6 izq. Matemáticamente, puede escribirse como:

$$w[n] = 1.0 \quad (4.18)$$

para $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

donde N es la longitud de la ventana. La ventana rectangular únicamente trunca la señal exactamente dentro de un intervalo de tiempo finito, es útil para analizar funciones transitorias que tienen una duración más corta que la de la ventana. Sin embargo, su uso es limitado debido a que este tipo de ventana es la que presenta la mayor cantidad de fuga espectral.

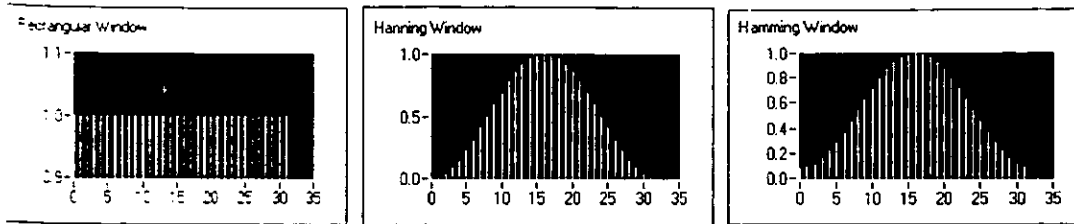


Figura 4.6. Ventanas: Rectangular (izq.), de Hanning (cent.) y de Hamming (der.)

La ventana de Hanning tiene una forma similar al medio ciclo de la función coseno y está definida por la ec 4.19. fig 4.6 cent.

$$w[n] = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi n / N) \quad (4.19)$$

para $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$

Este tipo de ventana es útil para analizar señales más grandes que el tiempo de duración de la ventana, aplicándose para propósitos generales.

Otra de las ventanas más útiles es la ventana de Hamming, que constituye una versión modificada de la ventana Hanning, fig 4.6 der. Su forma es también similar a una función coseno, sin embargo, a diferencia de la ventana de Hanning, esta no se atenúa hasta cero en sus extremos; la función matemática que define su forma se presenta en la ec 4.20.

$$w[n] = 0.5 - 0.46 \cos(2\pi n / N) \quad (4.20)$$

para $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$

4.4. Filtros.

Los edificios altos son estructuras con múltiples grados de libertad cuyo comportamiento dinámico puede estar determinado por modos superiores de vibrar con un amplio rango de frecuencias. En este tipo de estructuras es importante identificar cuáles son los modos que contribuyen de manera más importante a su respuesta dinámica. Para ello, se requiere restringir la banda de frecuencias de análisis a un rango determinado de valores. Una forma de lograr esto, es mediante el uso de filtros analógicos o digitales.

El diseño de filtros analógicos está reservado para especialistas porque requiere del conocimiento de matemáticas avanzadas y el entendimiento de los procesos que involucran al sistema que está afectado por el filtro. Gracias a los sistemas de muestreo moderno y a las herramientas de procesamiento digital de señales, es posible utilizar filtros digitales en aplicaciones que requieren flexibilidad y programabilidad, como audio, telecomunicaciones, geofísica, monitoreo médico y mediciones en estructuras.

Algunos filtros digitales se pueden usar para controlar parámetros tales como tipo de filtro, límite de frecuencias, amplitud de onda, etc. Entre las ventajas que poseen este tipo de filtros sobre los analógicos se pueden mencionar:

- Existe software programable.
- Son estables y predecibles.
- No tiene errores producidos por la humedad y no requieren componentes de precisión.
- Tiene una relación costo-beneficio mayor.

Cuando un filtro es capaz de transmitir sin distorsión las componentes de las frecuencias contenidas dentro de una banda dada, anulando el resto de las componentes fuera de esta, se conoce como filtro ideal. Aunque en rigor no existe este tipo de filtros, es importante conocer sus características principales. Para los filtros ideales, fig 4.7, existe una clasificación muy clara dependiendo del rango de frecuencias que deben pasar o ser atenuadas. A continuación se presentan algunos de estos filtros:

a) Filtro pasa-todo. Como su nombre lo indica, este filtro tiene la propiedad de transmitir sin distorsión toda la banda de frecuencias. Su expresión matemática está definida por la ec 4.21.

$$H(f) = H_0 e^{-i2\pi f t_0} \quad ; \quad -\infty < f < \infty \quad (4.21)$$

b) Filtro pasa-bajas. deja pasar a las bajas frecuencias; su expresión matemática está definida por la ec 4.22.

$$H(f) = \begin{cases} H_0 e^{-i2\pi f t_0} & ; \quad -f_c < f < f_c \\ 0 & ; \quad |f| > f_c \end{cases} \quad (4.22)$$

c) Filtro pasa-altas. Este filtro únicamente deja pasar las altas frecuencias; su expresión matemática está definida por la ec 4.23.

$$H(f) = \begin{cases} H_0 e^{-i2\pi f t_0} & ; \quad |f| \geq f_c \\ 0 & ; \quad |f| < f_c \end{cases} \quad (4.23)$$

d) Filtro pasa-bandas. Este filtro deja pasar una banda de frecuencias previamente definida; su expresión matemática está definida por la ec 4.24.

$$H(f) = \begin{cases} H_0 e^{-i2\pi f t_0} & ; \quad -f_2 \leq f \leq -f_1 \quad ; \quad f_1 \leq f \leq f_2 \\ 0 & ; \quad \forall ! f \end{cases} \quad (4.24)$$

En los filtros descritos, H_0 y t_0 representan la amplitud y el tiempo inicial del proceso, mientras que f es la frecuencia de análisis y f_c la frecuencia de corte del filtro.

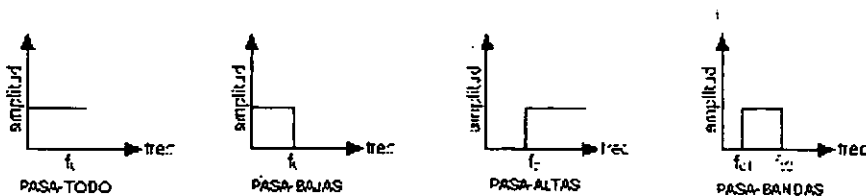


Figura 4.7. Identificación de los diferentes tipos de filtros ideales.

4.5. Propiedades dinámicas

Con el análisis de espectros de potencia, funciones de transferencia en amplitud y fase, y funciones de coherencia se pueden determinar las características dinámicas de un sistema estructural, como son las frecuencias de vibración, las formas modales y los niveles de amortiguamiento.

4.5.1. Determinación de frecuencias.

El comportamiento dinámico de una estructura puede no solo depender de una frecuencia de vibrar. El cálculo de las frecuencias de vibrar de estructuras ligeramente amortiguadas, como es el caso de edificios, puede obtenerse en función del espectro de amplitudes de Fourier. Una mejor estimación se logra con el empleo de espectros de potencia y funciones de transferencia (Bendat y Piersol, 1993). En el espectro de potencia de una señal de salida, las frecuencias asociadas a los picos no necesariamente corresponden a las frecuencias propias de vibrar de la estructura (frecuencias de resonancia de modos normales); también pueden corresponder a las frecuencias características de la excitación y ruido, ver ec 4.12.

El factor de ganancia, que puede ser obtenido a través de la función de transferencia, mostrara máximos en aquellas frecuencias llamadas de resonancia y que corresponden a modos normales de la estructura.

Para encontrar las frecuencias que corresponden a modos normales se hace uso del concepto de ángulo de fase, lo que se explica enseguida. En estructuras ligeramente amortiguadas, el espectro de transferencia de fase mostrara la relación de fase entre dos puntos cualesquiera donde hayan sido colocados instrumentos de medición, debido a que este es un espectro cruzado, normalizado respecto al espectro de alguno de los puntos (ec 4.14). De este modo, si para una frecuencia dada existe una relación de fase cero ó 180° entre estos instrumentos, significa que esta frecuencia corresponde a un modo normal de la estructura.

Si existe una cantidad de ruido extraño en las mediciones de salida, el acoplamiento de este ruido entre los modos normales puede distorsionar los resultados. Sin embargo, problemas de este tipo pueden revelarse por mediciones de coherencia y fase en los datos de salida, ya que la función de coherencia entre las mediciones con ruido y todas las otras mediciones sea menor que la unidad. Además, un acoplamiento entre modos normales causara que los datos de fase entre el mínimo de alguna de las mediciones sean diferente de cero o de 180° . Por lo tanto, como regla general, el espectro de potencia no debe ser usado para definir una forma modal normal a menos que las mediciones produzcan coherencia cercana a la unidad y fase cercana a cero ó a 180° con todas las otras mediciones de salida.

4.5.2. Determinación de formas modales.

El cálculo de las formas modales se puede llevar a cabo en función de los desplazamientos de los niveles respecto a un nivel de referencia (Ruiz, 1999). Por otro lado, las formas modales también

pueden obtenerse a partir de los espectros de potencia de la señal de salida. Para una frecuencia f_i , los desplazamientos modales se pueden obtener con la ec 4.25(Bëndat y Piersol, 1993).

$$\phi_i(y_j) = [G_{y_j y_j}(f_i)]^{1/2} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, 3, \dots \\ j = 1, 2, \dots, r \end{array} \quad (4.25)$$

Donde:

ϕ_i = Forma modal en el nivel j asociado a la frecuencia f_i .

y_j = Señal de respuesta en el nivel j .

$G_{y_j y_j}(f_i)$ = Ordenada del espectro de potencia de la señal de salida.

f_i = Frecuencia del modo normal i .

j = Nivel del edificio donde esta colocado en instrumento de medición.

r = Número de niveles instrumentados en el edificio.

El número mínimo de localizaciones de los instrumentos n_i , que se requieren para definir el modo i es igual a su orden. En términos generales, el número de niveles instrumentados dependerá de la altura total del edificio, cambios notables en rigidez o masa de la estructura y de la configuración arquitectónica. Además, para la obtención de los modos de vibrar de una estructura, es recomendable contar con información alterna como la estimación de formas modales normales a partir de estudios analíticos.

Las formas modales en traslación se obtienen analizando las señales de equipos colocados en puntos cercanos a los centros de torsión, de tal forma que los desplazamientos torsionales se minimicen. Mientras que las formas modales en torsión pueden encontrarse relacionando las señales de equipos colocados en un mismo nivel alejados del centro de torsión, en donde los desplazamientos son máximos. Además, el espectro de fase requiere que las direcciones de los instrumentos sean paralelas entre sí.

Es importante mencionar que la aplicación de esta técnica para el cálculo de las formas modales está limitada al caso donde la relación de amortiguamiento sea pequeña, es decir $\xi < 0.05$, lo cual se cumple en la mayoría de los edificios. Esta limitante se debe a que los picos del espectro de potencia de salida, están asociados a las frecuencias de resonancia f_r y no a las frecuencias naturales sin amortiguamiento f_n . Para valores pequeños de amortiguamiento, la frecuencia de resonancia será aproximadamente igual a la frecuencia natural sin amortiguamiento, ec 4.26.

$$f_r = f_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (4.26)$$

4.5.3. Determinación del nivel de amortiguamiento

El nivel de amortiguamiento de una estructura, es un parámetro difícil de estimar en forma precisa. Al respecto, existen diferentes formulaciones experimentales para estimar el porcentaje de amortiguamiento crítico de una estructura a escala natural, entre las cuales se puede mencionar el método de decremento logarítmico, el de la amplificación en resonancia, el de la curva de resonancia y el método de Kawasumi y Shima (1965), entre otros.

Dada la calidad de las señales registradas en el edificio que se analiza en este trabajo, el cálculo del amortiguamiento de la estructura se llevó a cabo con el método de Kawasumi y Shima (1965). Este método utiliza espectros de potencia definidos de forma clara, con buena resolución y suponiendo condiciones de ruido blanco (hipótesis generalmente usada en vibración ambiental).

Si se toma como referencia el espectro de potencia mostrado en la figura 4.8, el cálculo del nivel de amortiguamiento ξ empleando el método de Kawasumi y Shima, se lleva a cabo con las ecs 4.28 y 4.29.

$$\xi \cong \frac{A}{2} \sqrt{1 - \frac{3}{8} A^2} \quad (4.28)$$

$$A = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \sqrt{\lambda - 1} \quad (4.29)$$

Donde los valores de frecuencia ω_1 y ω_2 se obtienen al trazar una línea horizontal a una altura de $Y_{max} \lambda$. Comúnmente es utilizado un valor de 2 para la constante λ (González, 1989).

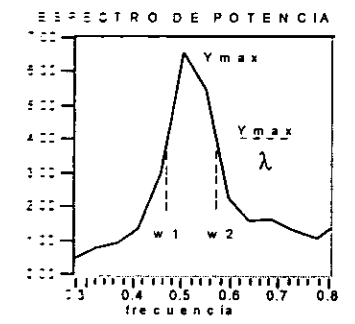


Figura 4.8. Obtención de la fracción del amortiguamiento, empleando el método de Kawasumi y Shima.

5. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO.

5.1. Sistema estructural.

La estructura analizada en este trabajo es el edificio de la ex Comisión Nacional de Subsistencia Populares (CONASUPO). Es una estructura de concreto reforzado usado para oficinas, de 23 niveles, que se componen de 1 sótano, planta baja, Mezanine, 17 niveles, 3 pent house y 1 helipuerto, su planta es casi rectangular de dimensiones aproximadas 20 m x 36 m. En la fig. 5.1 se muestra una planta tipo del edificio.

La estructura está localizada en la zona de transición (fig. 5.2) con un periodo del suelo de 1.1 s (0.88 Hz) de acuerdo a un estudio de vibración ambiental (Ayala y col., 1999). El edificio está cimentado sobre un cajón de concreto reforzado apoyado en pilotes.

Su sistema estructural está formado por muros de concreto colindantes en la dirección longitudinal (este-oeste) y marcos a base de columnas y losa aligerada en la dirección transversal (norte-sur).

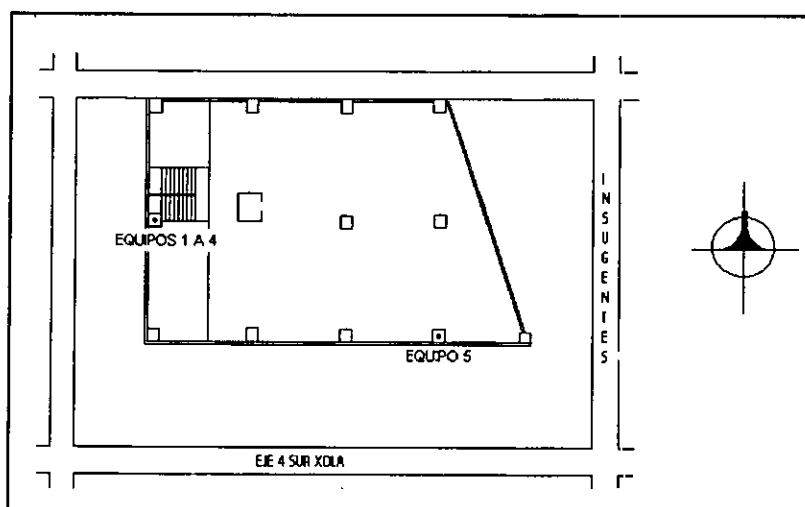


Figura 5.1. Planta tipo del edificio y ubicación de equipos de medición.

La revisión estructural del edificio previa a su reforzamiento, mostró desplazamientos excesivos en la dirección transversal, originado sin duda por la flexibilidad que posee el inmueble en esta dirección. A través de una inspección visual, se encontró que los muros y losas presentaban agrietamiento importante. Debido a esto, las autoridades de la ex CONASUPO decidieron llevar a cabo un proyecto de reforzamiento de la estructura.

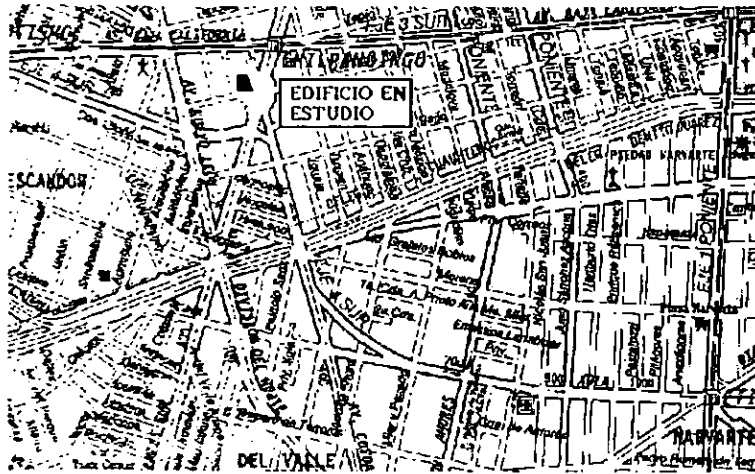


Figura 5.2. ubicación del inmueble en la zona del Valle de México

5.2. Características del reforzamiento.

Conscientes de la existencia de incertidumbres para contar con un modelo matemático congruente con su respuesta real, se incluyó, como parte del proyecto de reforzamiento estructural del edificio de la ex CONASUPO, un sistema de medición y monitoreo sísmico con el objeto de evaluar la eficiencia del reforzamiento propuesto y estudiar el comportamiento sísmico del edificio en función de sus propiedades dinámicas (frecuencias de vibrar, modos y amortiguamiento). La instalación del sistema de monitoreo, previa al refuerzo del edificio, permitió evaluar su comportamiento antes, durante y después de estos trabajos, con base en mediciones de señales de vibración ambiental y sísmicas. El funcionamiento de este sistema se detalla en el capítulo 6.

El reforzamiento del edificio se llevó a cabo mediante la inyección de resina epóxica en las grietas de los muros longitudinales y del sistema de losa aligerada, mientras que en el sentido transversal se colocaron diagonales metálicas y disipadores de energía, colocados estratégicamente para reducir el daño ante eventos sísmicos intensos. En la fig. 5.3 se muestra el reforzamiento del edificio en su parte anterior y posterior. Las características de los dispositivos disipadores de energía empleados en el edificio se describen en el siguiente inciso.

5.2.1. Descripción del disipador de energía.

El dispositivo que se utilizó en el edificio de la ex CONASUPO es un disipador de energía concebido por el Ing. Jorge Ortega Beltrán, pero finalmente diseñado por los Ingenieros Jaime Antoniano y Raúl Jean, quienes participaron en el proyecto de reforzamiento del edificio.

El principio del disipador se basa en el modelo de una viga simplemente apoyada en sus extremos, la cual recibe dos cargas puntuales perpendiculares a su plano en sus tercios medios, fig 5.4. Para el caso del disipador, la viga simplemente apoyada corresponde a una placa rectangular de acero A36, de 22.8x41.0 cm y 2.5 cm de espesor, soldada en sus extremos cortos a dos cilindros huecos de acero que pueden girar libremente sobre pernos.

Si se analizan los diagramas de elementos mecánicos producidos por la acción de las cargas sobre la placa, se observa que se alcanzan valores máximos de momento flexionante y fuerza cortante

en el punto de aplicación de dichas cargas, lo cual garantiza la fluencia de la placa en esos puntos. Es importante mencionar que estos elementos mecánicos no varían en el rango de deformaciones pequeñas y aún en el rango no lineal de la estructura, sin embargo, esto no es necesariamente cierto si se consideran deformaciones grandes (Fernández, Ayala y García, 1999).

La aplicación de las cargas sobre el disipador se produce por el desplazamiento relativo de los niveles, los cuales transmiten fuerzas normales a las diagonales de acero, quienes a su vez deslizan la caja metálica que contiene a la placa o disipador. El contacto entre el disipador y las placas sujetas al nivel inferior, produce las cargas puntuales.

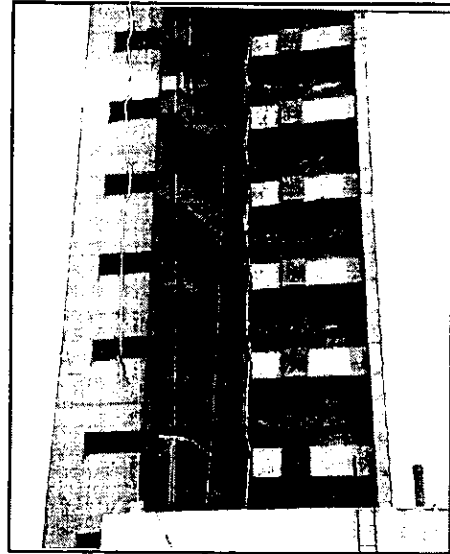


Figura 5.3. Reforzamiento estructural del edificio de la CONASUPO

Previo a la colocación de los disipadores, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se realizó un estudio (Escobar y Sánchez, 1998) cuyos objetivos fueron:

- a) Determinar las propiedades mecánicas del acero con el que serían fabricados los disipadores.
- b) Estudiar el comportamiento estructural de las placas ante cargas estáticas y dinámicas.
- c) Determinar la rigidez y capacidad de disipación de energía de las placas de acero.

Los resultados obtenidos de este estudio muestran en términos generales que el disipador cumple su objetivo (Ayala y García, 1998).

Después de analizar algunas propuestas de distribución de los disipadores de energía, finalmente se distribuyeron como se muestra en las figs 5.6 y 5.7.

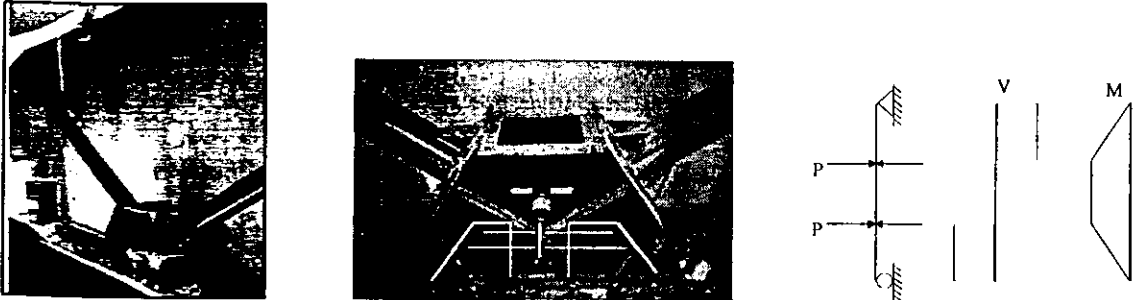


Figura 5.4. Disipador de energía y su principio de funcionamiento.

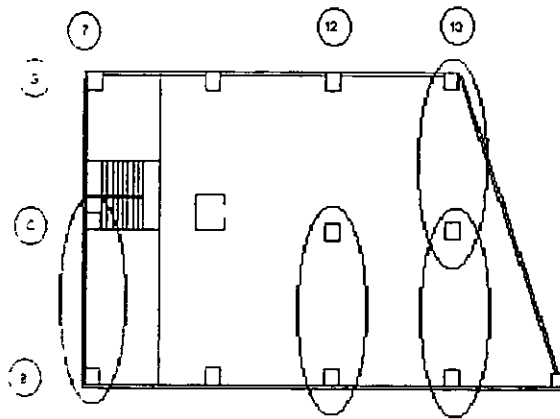


Figura 5.6. localización en planta de los disipadores de energía.

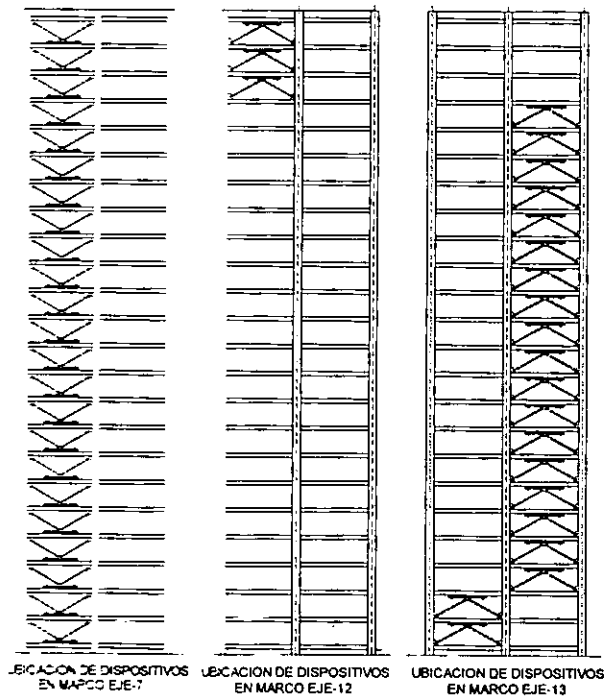


Figura 5.7 localización en elevación de los disipadores de energía.

6. INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DEL EDIFICIO.

6.1. Características del sistema de monitoreo sísmico.

El sistema de medición y monitoreo sísmico instalado en el edificio de la ex CONASUPO, está formado por 5 instrumentos (acelerómetros) como el mostrado en la fig 6.1, ubicados en el sótano, piso 6, piso 13 y dos equipos en la azotea, fig 5.1. La ubicación de los instrumentos en planta se basó en los resultados de un estudio previo (Ayala y cols, 1999), en el que se observó que los efectos de torsión eran mínimos, debido a la gran rigidez torsional proporcionada por los muros longitudinales de concreto. Por esta razón y por facilidad de acceso, se colocaron cuatro instrumentos en la línea de columnas adyacente a la zona de escaleras y un quinto equipo fue colocado diagonalmente en la azotea, para ratificar que los efectos de torsión fueran menores.

La denominación de los equipos o estaciones de medición fue determinada de acuerdo a su ubicación en el edificio. A continuación se describen las características más importantes de cada instrumento.

Equipo No. 1.

Ubicación: Sótano.

Nombre de la estación: sot.

- ✓ Registrador digital GSR-12 marca Terra-Technology
- ✓ 12 bits
- ✓ 3 canales de registro (sensor triaxial interno SSA-320)
- ✓ Montaje vertical
- ✓ Memoria RAM 4.0 MB
- ✓ Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 0.50 g
- ✓ Umbral de disparo al que fue configurado: 2 gals (0.002g)
- ✓ Tiempo de pre-evento: 30 s.
- ✓ Tiempo de post-evento: 20 s.
- ✓ Muestras por segundo: 100

Equipos No. 2 y 3.

Ubicación: Piso 6 y piso 13.

Nombre de la estación: p6 y p13 respectivamente.

- ✓ Registrador digital GSR-12 marca Terra-Technology
- ✓ 12 bits
- ✓ 2 canales de registro (sensor biaxial interno SSA-220)
- ✓ Montaje vertical
- ✓ Memoria RAM 4.0 MB
- ✓ Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 1.00 g
- ✓ Umbral de disparo al que fueron configurados: 3 gals (0.003g)
- ✓ Tiempo de pre-evento: 30 s.
- ✓ Tiempo de post-evento: 20 s.
- ✓ Muestras por segundo: 100

Equipo No. 4. (Equipo maestro)

Ubicación: Azotea escalera.

Nombre de la estación: aes.

- ✓ Registradores digitales GSR-12 marca Terra-Technology
- ✓ 12 bits
- ✓ 3 canales de registro (sensor triaxial interno SSA-320)
- ✓ Montaje vertical
- ✓ Memoria RAM 4.0 MB
- ✓ Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 2.00 g
- ✓ Umbral de disparo al que fue configurado: 6 gals (0.006g)
- ✓ Tiempo de pre-evento: 30 s.
- ✓ Tiempo de post-evento: 20 s.
- ✓ Muestras por segundo: 100
- ✓ Funciona como equipo maestro con una interfaz 485 para comunicación con los otros equipos.
- ✓ Equipado con GPS (unidad de geoposicionamiento).
- ✓ Equipado con módem para la comunicación a distancia.

Equipo No. 5.

Ubicación: Azotea exterior.

Nombre de la estación: aex.

- ✓ Registradores digitales GSR-16 marca Terra-Technology
- ✓ 16 bits
- ✓ 3 canales de registro (sensor triaxial interno SSA-320)
- ✓ Montaje vertical
- ✓ Memoria RAM 4.0 MB
- ✓ Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 2.00 g
- ✓ Umbral de disparo al que fue configurado: 6 gals (0.006g)
- ✓ Tiempo de pre-evento: 30 s.
- ✓ Tiempo de post-evento: 20 s.
- ✓ Muestras por segundo: 100

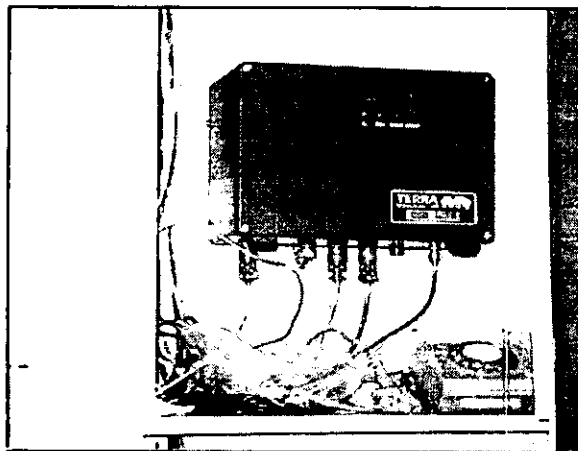


Figura 6.1. Equipo de medición maestro tipo GSR-12 que se encuentra instalado en la azotea del edificio de la CONASUPO

El sistema de medición y monitoreo sísmico está controlado por un equipo maestro (equipo No. 4) colocado en la azotea, el cual se encarga de garantizar que el disparo sea simultáneo en todos los instrumentos. Además, posee un modem para el resguardo de información a través de una línea telefónica y una unidad de geoposicionamiento (GPS) que nos proporciona el tiempo exacto a nivel mundial, para tener un tiempo común de referencia de los registros sísmicos en el edificio respecto a otras estaciones localizadas en el Valle de México y en las costas del Pacífico Sur del país.

El registro de datos se activa simultáneamente en todos los equipos del sistema cuando en cualquiera de ellos se rebasa el umbral de disparo preestablecido. Es importante mencionar que la amplitud de estos niveles de aceleración se definió, tratando de evitar la saturación de la memoria física de los equipos por efecto de ruido ambiental insignificante.

Una vez almacenadas las señales en forma digital, se procesan mediante el programa ALLView (Terra Technology, 1999), el cual controla el funcionamiento interno de los equipos, sin embargo, su empleo está limitado al cálculo de velocidad, desplazamiento y espectros de Fourier y de potencia. Con ayuda de este programa es posible transformar las señales registradas al sistema ASCII, para su proceso posterior.

6.2. Registro de señales de vibración ambiental y forzada.

Para la obtención de las propiedades dinámicas de un edificio, existen dos tipos de pruebas aplicadas a estructuras reales (González, 1989). La primera de ellas asume que el comportamiento de la estructura es lineal y es posible determinar los principales parámetros dinámicos (periodos, formas modales y amortiguamiento). El segundo tipo considera el comportamiento no lineal de la estructura, cuyo objetivo es estudiar la fluencia y la disipación de energía en elementos estructurales.

Existen algunos tipos de pruebas dinámicas que se realizan en estructuras reales, sin embargo, nos enfocaremos al estudio de pruebas de vibración ambiental y de vibración forzada. Como su nombre lo dice, las señales de vibración ambiental se producen por efectos de ruido interno y externo a la estructura, como el tránsito de vehículos, efectos de viento o motores, etc., mientras que las señales producto de vibración forzada se producen principalmente por excitaciones sísmicas y dispositivos mecánicos fabricados por el hombre, entre otras.

El registro de señales sísmicas y/o ambientales se obtiene en términos de aceleración vs tiempo en tres componentes ortogonales. Para el análisis de las mismas, se asume la hipótesis de que las fuentes de excitación producen datos estacionarios y ergódicos, que excitan a la estructura en todos los modos de vibrar.

Aunque el análisis de señales de vibración ambiental está basado en el comportamiento lineal de la estructura debido a la magnitud de sus desplazamientos, puede proporcionarnos información valiosa en edificios en donde se cuente con mediciones antes y después de un sismo severo, en estructuras reforzadas o en aquellas en las que se desea analizar la interacción suelo-estructura.

Para llevar a cabo el análisis de señales se distinguen 2 etapas principales.

- La inspección visual de las señales, mediante la cual es posible identificar algunos parámetros como los niveles máximos de amplitud, duración total del evento y el contenido de frecuencias.
- El análisis y proceso numérico mediante la obtención de espectros. Para el cálculo de frecuencias de vibrar se utilizan espectros de Fourier y de Potencia así como funciones de transferencia, mientras que para obtener los modos de vibrar de la estructura se hace uso de la función de coherencia y la función de fase. Además, se puede determinar la fracción de amortiguamiento crítico con base en las amplitudes del espectro de potencia.

Dada la complejidad del proceso numérico involucrado en el análisis de señales, se utilizan programas de computadora como el que se desarrollo en este trabajo y que se describe en el siguiente capítulo.

7. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE SEÑALES.

En este capítulo se describe la metodología empleada para llevar a cabo el proceso numérico y el análisis de las señales registradas para obtener las propiedades dinámicas del edificio en estudio (frecuencias, modos de vibrar y amortiguamiento) con ayuda de un instrumento virtual desarrollado para este propósito. El instrumento virtual se programó empleando las herramientas del ambiente LabVIEW (National Instruments, 1998).

7.1. Procesamiento de señales.

El proceso de la información registrada en los equipos de medición inicia con el respaldo de las señales, ya sea directamente en el sitio mediante una computadora portátil o vía modem a una computadora distante. El acceso al sistema se logra a través del equipo maestro (equipo No. 4) del cual es posible comunicarse al resto de los equipos. Para el almacenamiento de las señales, cada equipo cuenta con una memoria de estado sólido de 4 Mb.

Con ayuda del programa que controla el funcionamiento de los equipos (programa Allview), es posible visualizar las señales registradas y hacer un análisis preliminar de las mismas, utilizando espectros de Fourier y de potencia. Este programa utiliza una nomenclatura especial para identificar las señales registradas, en la cual los tres primeros caracteres corresponden al nombre de la estación donde se encuentra ubicado el equipo, los siguientes tres indican la fecha del evento con base en el calendario juliano y los dos últimos corresponden al número de evento registrado durante ese día. El intervalo de muestreo seleccionado para el registro de señales fue de 100 muestras por segundo.

Es importante mencionar que el registro de aceleraciones en los equipos del edificio se produce de manera simultánea siempre que se supere el umbral de disparo preestablecido en cualquiera de ellos. Al respecto, este nivel de aceleración se fijó en un rango de 2 a 6 gals, dependiendo de la ubicación de los instrumentos en la altura del edificio. Además, es posible agregar a la señal registrada, un periodo de grabación al inicio y al final de la misma (periodo de pre-evento y post-evento), con el objeto de suavizar las amplitudes de aceleraciones en los extremos del registro, aunque, si la señal tiene una duración mínima para ser estudiada adecuadamente, es común enfocarse solo a la fase intensa de la señal sísmica. En el caso de que la señal sea muy corta, será de interés considerar los periodos de pre y post-evento.

Entre otras cosas, el programa Allview, permite realizar el disparo del sistema mediante software e iniciar el registro simultáneo de señales por un periodo de tiempo determinado. Esta opción es de utilidad para el registro de señales producto de vibración ambiental o excitaciones previamente programadas.

Una vez que han sido respaldadas las señales registradas, estas pueden ser regrabadas en formato ASCII para llevar a cabo su análisis detallado en el instrumento virtual que se describe en la sección 7.3. Para esto es necesario que la señal sea separada en sus tres componentes ortogonales.

7.2. Análisis de señales.

El análisis de las señales inicia con el cálculo del espectro de amplitudes de Fourier, el cual se obtiene con ayuda de la transformada discreta de Fourier. Este espectro muestra la señal en el dominio de la frecuencia, así como, las frecuencias dominantes que la forman. Como se mencionó anteriormente, las amplitudes más importantes del espectro no necesariamente corresponden a las frecuencias propias de la estructura, ya que algunos máximos corresponden a frecuencias de la excitación o al ruido. En la mayoría de los casos, el contar con una estimación previa basada en resultados analíticos permite identificar el rango de frecuencias que deben estudiarse en los espectros.

Para este trabajo, la estimación de las frecuencias se realiza calculando espectros promedio, a partir de segmentos de señales de igual longitud y atenuando cada uno de estos mediante el uso de ventanas tipo Hanning. Dada la simetría de los espectros, es común representar sólo la parte positiva (espectro de un solo lado).

El cálculo de espectros de potencia es útil, entre otras cosas, para determinar las formas modales. Para una frecuencia modal identificada, las amplitudes de los espectros en cada estación de medición corresponden a sus respectivas ordenadas de la forma modal. Dado que el espectro de potencia se construye con el cuadrado de las amplitudes del espectro de Fourier, es posible identificar con mayor claridad las frecuencias de interés. Además, por medio de este espectro se calcula el porcentaje de amortiguamiento crítico de la estructura, (Kawasumi y Shima, 1965).

En ocasiones, no basta con analizar las amplitudes del espectro de potencia para el cálculo de las frecuencias de resonancia, por lo que es conveniente utilizar el espectro cruzado (de amplitud y fase) de dos señales y la función de coherencia. Con la parte compleja del espectro cruzado, se pueden encontrar el ángulo de fase entre los dos instrumentos, con esto se puede definir el orden de cada frecuencia identificada.

La función de coherencia es útil para determinar la validez de la fase asociada a una frecuencia y por lo tanto, es posible corroborar que estas frecuencias corresponden a las formas modales de la estructura. La coherencia mostrará valores pequeños para aquellas frecuencias que contienen una presencia importante de ruido.

Si se cuenta con un instrumento colocado en el terreno circundante del edificio, haciendo uso de las funciones de transferencia, se pueden obtener frecuencias y formas modales ignorando los efectos de la interacción suelo-estructura. Para llevarlo a cabo, se realizan cocientes espectrales entre los pisos superiores y el terreno.

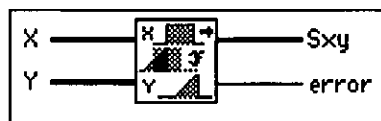
El cálculo y manejo de espectros para el análisis de las señales, puede realizarse mediante el uso del instrumento virtual desarrollado en esta tesis. Este instrumento calcula todos los espectros descritos anteriormente. La adquisición de datos, el análisis y procesamiento de señales y la graficación de resultados, se presentan con detalle en la siguiente sección.

7.3. Descripción del instrumento virtual para el análisis de señales.

Con ayuda del lenguaje LabVIEW (National Instruments 1998), fue posible desarrollar un instrumento virtual para realizar el análisis de las señales sísmicas y ambientales registradas en el sistema de medición y monitoreo sísmico instalado en el edificio de la ex CONASUPO, con el propósito de obtener las propiedades dinámicas de la estructura.

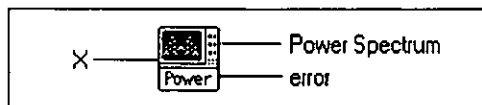
El sistema del LabView trabaja a base de iconos, los cuales realizan tareas análogas a las que llevan a cabo las subrutinas de funciones matemáticas, empleadas en los lenguajes de programación convencionales. Estos iconos pueden conectarse y manipularse para obtener procesos o funciones matemáticas más complejas. Un elemento importante de los iconos son los controles, mediante los cuales se registra la información y se despliegan los resultados a través de indicadores de diversos tipos (numéricos, gráficos, etc).

A continuación se presenta la simbología que emplea el instrumento virtual para el cálculo de algunas de las funciones matemáticas más importantes en el análisis de señales.



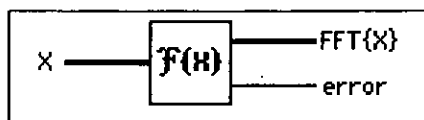
$$S_{xy}(f) = X^*(f)Y(f)$$

Fig 7.1. Espectro cruzado de la señal X y Y (magnitud).



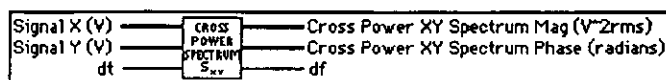
$$S_{xx}(f) = X^*(f)X(f) = |X(f)|^2$$

Fig 7.2. Espectro de potencia de la señal X.



$$Y = Y_{Re} + jY_{Im}$$

Fig 7.3. Transformada real de Fourier de la señal X.



$$S_{xy} = \frac{DFT^*(señal X) \times DFT(señal Y)}{N^2}$$

Fig 7.4. Espectro cruzado de la señal X y Y (magnitud y fase).



$$H(f) = \frac{\text{Espectro cruzado(Estimulo, Respuesta)}}{\text{Espectro de potencia(Estimulo)}}$$

Fig 7.5. Funcion de transferencia de la señal X y Y.

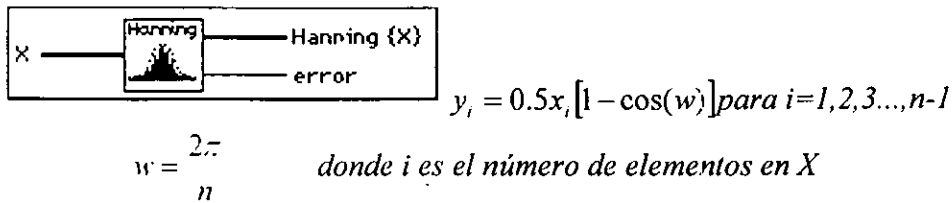


Fig 7.6. Ventana de Hanning de una secuencia de entrada X .

En términos generales, se identifican tres etapas en el proceso numérico del instrumento virtual, las cuales se describen en la fig 7.7.

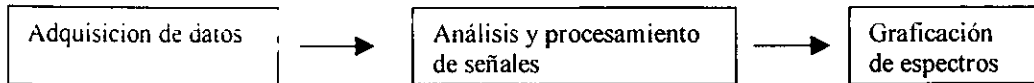


Figura 7.7. Secuencia del instrumento virtual.

El instrumento virtual tiene la capacidad de realizar el análisis de dos señales independientes o bien, de manera correlacionada, para ello calcula y grafica los siguientes espectros:

- Espectro de Fourier de una señal individual.
- Espectro de potencia de una señal individual.
- Espectro cruzado entre dos señales (amplitud y fase).
- Función de transferencia (amplitud y fase).
- Función de coherencia.

La pantalla del instrumento virtual y el despliegue de los espectros se muestra en la fig 7.8, y en la fig 7.9 se puede observar al instrumento virtual ensamblando las diferentes fases que lo componen, es decir, la adquisición de datos, el procesamiento y análisis y la graficación de los resultados.

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

INSTRUMENTO VIRTUAL
PROPIEDADES DINÁMICAS DE EDIFICIOS

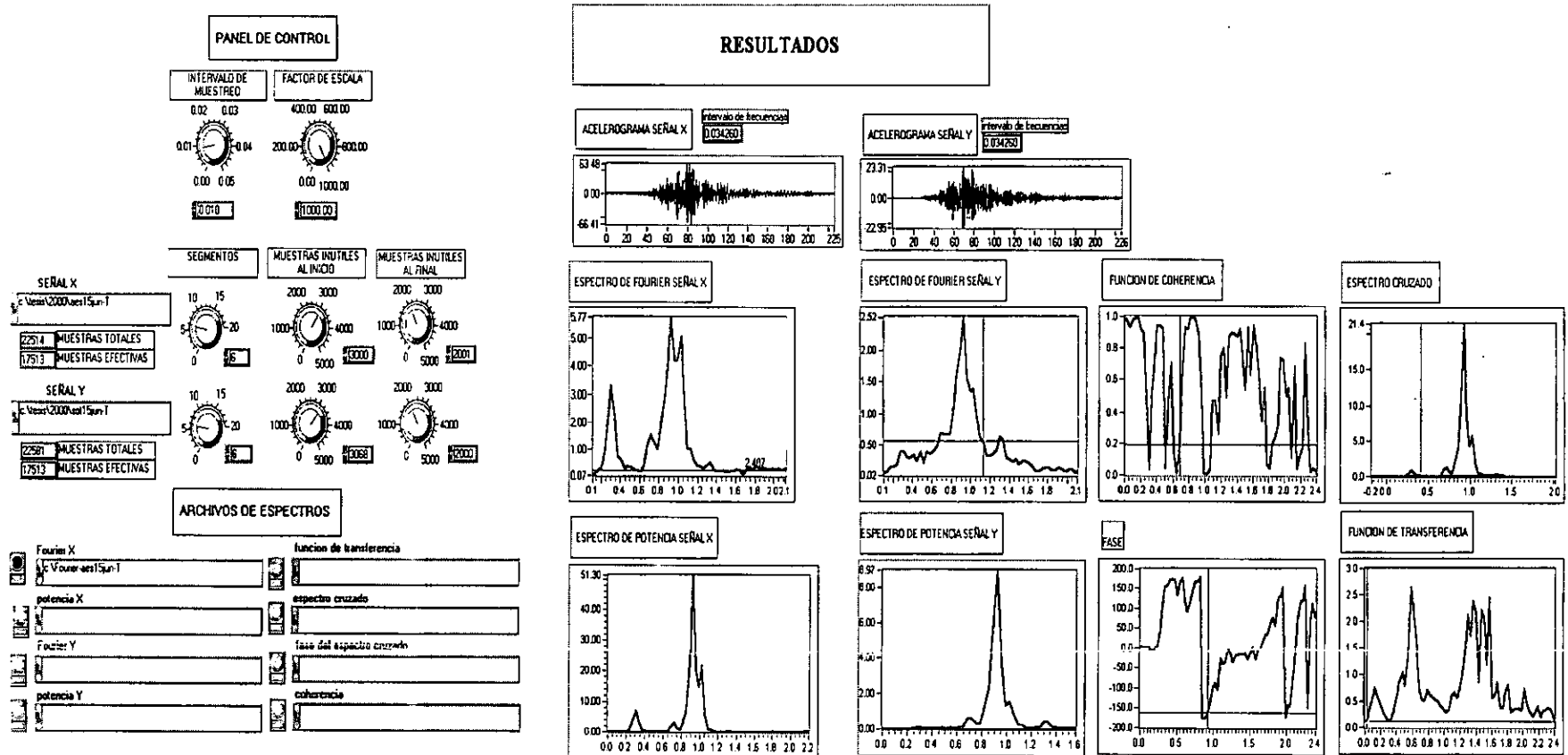


Figura 7.8. Panel de control del instrumento virtual.

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

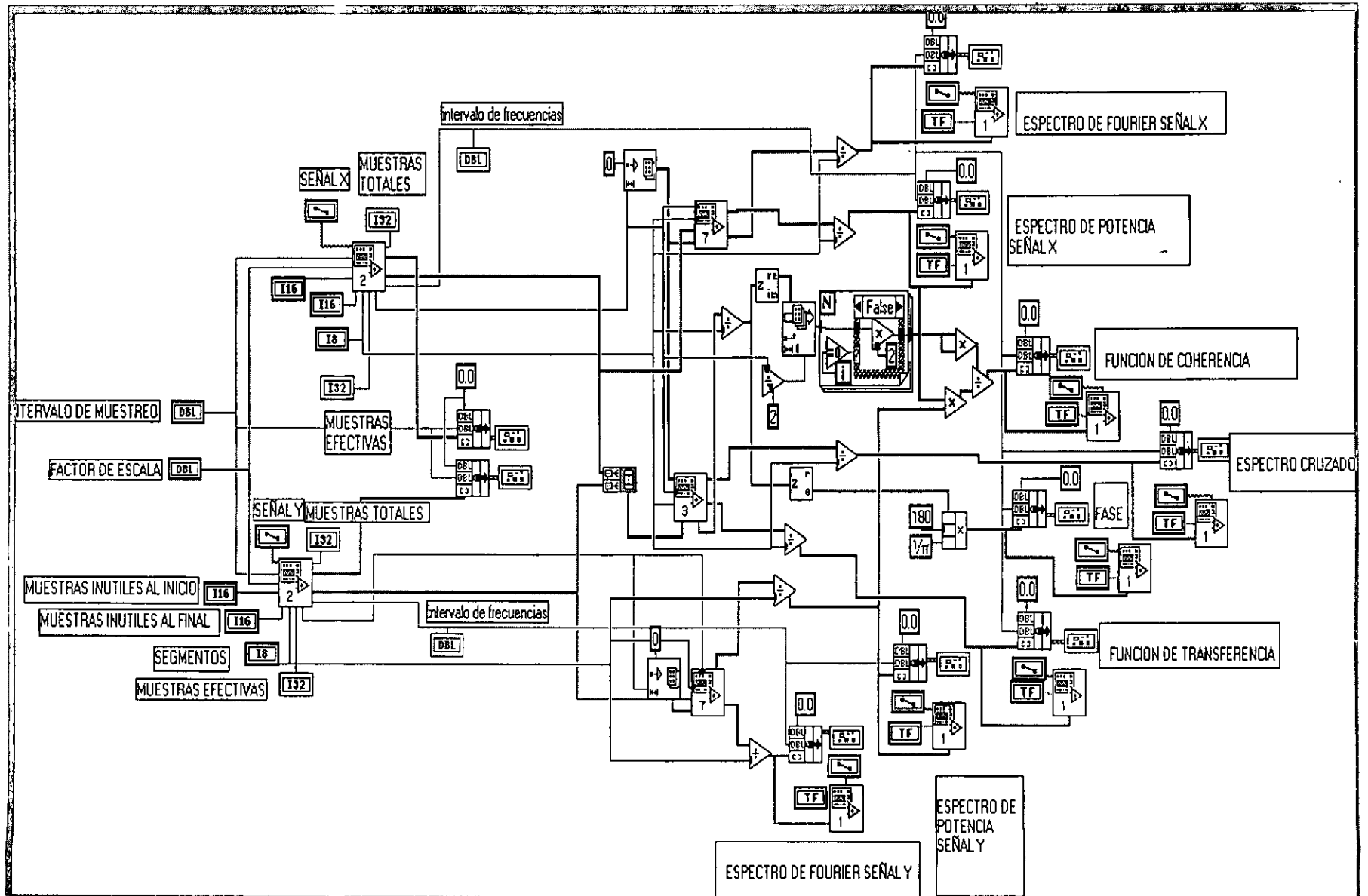


Figura 7.9. Diagrama del instrumento virtual.

7.3.1. Adquisición de datos.

En esta fase, fig 7.10, es adquirida la información de la señal en términos de aceleraciones contra tiempo, correspondientes a las diferentes componentes o canales de registro de los equipos. Los datos que deben introducirse al programa, son:

- Nombre del archivo de datos.
- Número de muestras que no se analizan al inicio y al final del registro.
- Número de segmentos en el que se divide la señal para obtener valores promedio.
- Intervalo de muestreo.
- Factor de escala de las aceleraciones.

El registro de aceleraciones contra tiempo que contiene el archivo de datos, deberá estar escrito en formato ASCII y en una sola columna.

Es posible que la señal registrada contenga aceleraciones que pueden despreciarse al inicio o al final del registro. El instrumento virtual puede eliminar estos datos del análisis.

Para calcular los espectros promedio, la señal puede ser dividida en un número determinado de segmentos, considerando los requisitos mínimos de muestreo mencionados en el capítulo 4.

El valor predeterminado del intervalo de muestreo es de 0.01 segundos (100 muestras por segundo), sin embargo, este valor puede ser modificado.

Mediante el factor de escala, es posible definir las unidades de aceleración de los registros de entrada.

La información de los incisos *a b* y *c* debe proporcionarse para cada señal, mientras que la correspondiente a los incisos *d* y *e* será necesaria si se desea realizar un análisis de correlación entre dos señales.

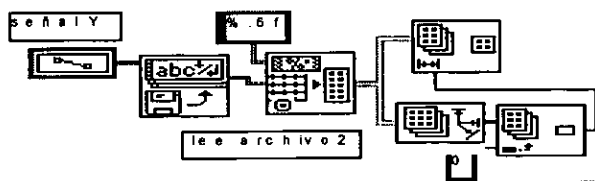


Figura 7.10. Segmento del proceso de adquisición datos.

7.3.2. Análisis y procesamiento de señales.

Esta fase corresponde al cuerpo principal del programa, fig 7.11, ya que en ella se realiza el análisis y procesamiento de las señales adquiridas. Para una señal en particular, se desarrolla la siguiente secuencia:

- Se aplica el factor de escala correspondiente al registro de aceleraciones.
- Se divide la señal en *n* segmentos para su estudio.
- Cada segmento se atenúa mediante una ventana de tipo Hanning.

- Se calcula el espectro de Fourier de cada segmento, empleando la transformada discreta.
- Se calcula el espectro de potencia.
- Se obtienen los espectros promedio con base en los segmentos estudiados.

Si se desea estudiar la correlación entre dos señales, se requieren calcular adicionalmente:

- El espectro cruzado de cada uno de los segmentos de las dos señales
- Los espectros de coherencia.
- Las funciones de transferencia.
- Las funciones de fase.
- Los espectros promedio de las funciones anteriores.

Los espectros obtenidos tienen diferentes opciones de visualización que permiten realizar un acercamiento en el rango de frecuencias que nos interesa, así como en las ordenadas de las mismas. Existe la opción de visualizar un indicador, que recorre el espectro proporcionando las coordenadas (frecuencia y amplitud) de todos los puntos de la función del espectro. Esta opción es útil, ya que podemos encontrar las frecuencias correspondientes a los máximos mostrados en el espectro dentro del rango de frecuencias de interés.

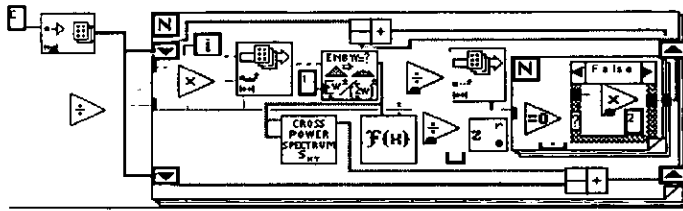


Figura 7.11. Subrutina para el cálculo de los espectros de Fourier y de potencia.

7.3.3. Graficación de resultados.

Una vez introducida la información de interés, el cálculo de los espectros es automático. El instrumento virtual logra espectros con resolución de acuerdo al número de muestras de cada segmento de datos del registro, como se vio en el capítulo 4, y toma la frecuencia cero como inicio de todos los espectros. La magnitud de las ordenadas es congruente con la magnitud de las aceleraciones adquiridas afectada por el factor de multiplicación de aceleraciones que se impuso. La manipulación de los espectros obtenidos requiere de una mínima habilidad en el uso del programa LabView, con lo que se pueden desplazar los espectros en cualquier intervalo de frecuencias dentro del espectro y modificar la escala de ordenadas de lineal a logarítmica, colocando un marcador e indicando cada uno de los puntos del espectro, entre otras cosas, fig 7.12.

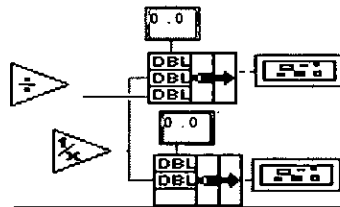


Figura 7.12. Segmento del proceso de graficación de resultados.

8. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL EDIFICIO.

Desde mayo de 1998, fecha en la cual se instaló el sistema de monitoreo sísmico en el edificio, se han obtenido una gran cantidad de registros producidos principalmente por ruido ambiental (tráfico de vehículos, etc.) y por ruido interno en el edificio (elevadores, planta de luz, planta de aire, etc.), además de los registros debidos a eventos sísmicos. Sin embargo, no todas las señales registradas han sido útiles para calcular las propiedades dinámicas de la estructura, debido a que sus espectros no definen de manera clara las frecuencias de la estructura. En el caso de señales de origen ambiental, esto puede atribuirse en parte a la ubicación de las fuentes de excitación, que no son necesariamente generadas en la base del edificio, y por los bajos niveles de aceleración detectados debido a la gran rigidez de la estructura.

8.1 Señales de vibración ambiental.

A diferencia de las señales de origen sísmico, las señales de vibración ambiental han sido registradas en diversas etapas del reforzamiento del edificio, desde la instalación del sistema de monitoreo. Con los registros obtenidos de señales de tipo ambiental, fue posible estimar los valores de los periodos fundamentales del edificio antes, durante y después de su reforzamiento. Se obtuvieron, además, las formas modales correspondientes a los dos primeros modos de la estructura en sus dos direcciones principales.

8.1.1. Evolución de los periodos fundamentales del edificio.

El proyecto de reparación y reforzamiento se llevó a cabo entre los meses de diciembre de 1998 y febrero de 1999. En la tabla 8.1 se muestran los rangos de las frecuencias y periodos obtenidos en las tres etapas de medición de señales producto de vibración ambiental, es decir, antes, durante y después del reforzamiento. En la tabla 8.2. se presentan las señales producto de vibración ambiental utilizadas para el cálculo de las frecuencias de vibrar de la estructura en sus dos direcciones principales antes, durante y después del refuerzo. En la fig 8.1. se puede observar la evolución de estos resultados en el tiempo. Para este caso, los valores de periodos fueron calculados principalmente a partir de espectros de Fourier de las señales registradas en los instrumentos colocados en la azotea del edificio, ya que por su ubicación en la altura del edificio, se obtuvo una mejor calidad en las señales.

Tabla 8.1. Rangos de valores de frecuencias y periodos en vibración ambiental.

Etapa	Dirección longitudinal		Dirección transversal	
	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
Antes del refuerzo	0.56 a 0.64	1.57-1.78	0.29-0.34	2.92-3.41
Durante el refuerzo	0.61 a 0.68	1.46-1.64	0.27-0.39	2.56-3.72
Después del refuerzo	0.61 a 0.64	1.57-1.64	0.32-0.39	2.56-3.15

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

*Tabla 8.2. Frecuencias y periodos obtenidos de vibración ambiental
antes, durante y después del refuerzo.*

archivo	Fecha	ubic	Frecuencia (Hz)		Periodo (s)	
			Long	Trans	Long	trans
1 17104	20/6/98	acs	0.586	-	1.71	-
1 17301	22/6/98	acs	0.562	-	1.78	-
1 17305	22/6/98	acs	0.586	0.317	1.71	3.15
1 17307	22/6/98	acs	0.562	0.317	1.78	3.15
1 1730A	22/6/98	acs	0.586	0.33	1.71	3.03
1 1730C	22/6/98	acs	0.586	0.317	1.71	3.15
1 1730D	22/6/98	acs	0.598	0.317	1.67	3.15
1 18700	6/7/98	acs	0.61	-	1.64	-
1 18702	6/7/98	acs	0.61	0.342	1.64	2.92
1 19000	9/7/98	acs	0.598	0.33	1.67	3.03
1 19001	9/7/98	acs	0.586	0.317	1.71	3.15
1 19002	9/7/98	acs	0.61	0.317	1.64	3.15
1 19003	9/7/98	acs	0.586	0.342	1.71	2.92
1 19004	9/7/98	acs	0.61	-	1.64	2.92
1 19005	9/7/98	acs	0.61	-	1.64	-
1 19006	9/7/98	acs	0.58	0.33	1.72	3.03
1 19007	9/7/98	acs	0.586	0.293	1.71	3.41
1 19008	9/7/98	acs	0.61	0.317	1.64	3.15
1 19009	9/7/98	acs	0.586	0.342	1.71	2.92
1 1900A	9/7/98	acs	0.598	0.33	1.67	3.03
1 1900B	9/7/98	acs	0.586	0.342	1.71	2.92
1 1900C	9/7/98	acs	0.61	0.342	1.64	2.92
1 1900D	9/7/98	acs	0.586	0.317	1.71	3.15
1 1900E	9/7/98	acs	0.598	0.33	1.67	3.03
1 1900F	9/7/98	acs	0.598	0.33	1.67	3.03
1 1900G	9/7/98	acs	0.598	0.342	1.67	2.92
1 19100	10/7/98	acs	0.586	0.33	1.71	3.03
1 19101	10/7/98	acs	-	0.33	-	3.03
1 19102	10/7/98	acs	0.598	0.33	1.67	3.03
1 19103	10/7/98	acs	0.586	-	1.71	-
1 19104	10/7/98	acs	0.586	0.33	1.71	3.03
1 19105	10/7/98	acs	0.61	0.317	1.64	3.15
1 19106	10/7/98	acs	0.586	0.317	1.71	3.15
1 19108	10/7/98	acs	0.586	0.342	1.71	2.92
1 19300	12/7/98	acs	0.592	0.323	1.69	3.10
1 19301	12/7/98	acs	0.61	0.317	1.64	3.15
1 19400	13/7/98	acs	0.586	0.342	1.71	2.92
1 19500	14/7/98	acs	0.598	0.317	1.67	3.15
1 19501	14/7/98	acs	0.604	0.33	1.66	3.03
1 19502	14/7/98	acs	0.61	-	1.64	-
1 19600	15/7/98	acs	0.61	0.342	1.64	2.92
1 19800	17/7/98	acs	-	0.342	-	2.92
1 20100	20/7/98	acs	0.61	-	1.64	-
1 20101	20/7/98	acs	-	0.317	-	3.15
1 20201	21/7/98	acs	0.61	0.342	1.64	2.92
1 20500	24/7/98	acs	0.61	0.342	1.64	2.92
1 20603	25/7/98	acs	0.61	-	1.64	-
1 23700	25/8/98	acs	0.61	0.342	1.64	2.92
1 26000	17/9/98	acs	0.635	0.342	1.57	2.92
1 26501	22/9/98	acs	0.635	0.317	1.57	3.15
2 30800	4/11/98	pis06	0.635	-	1.57	-
3 31700	13/11/98	pis013	0.635	-	1.57	-
3 33207	28/11/98	pis013	0.635	-	1.57	-
3 33500	1/12/98	pis013	0.635	0.342	1.57	2.92
3 35500	21/12/98	pis013	0.635	-	1.57	-
acs06002	1/3/99	acs	0.659	-	1.52	-
acs06004	1/3/99	acs	0.635	-	1.57	-
acs0600A	1/3/99	acs	0.684	0.269	1.46	3.72
acs0600F	1/3/99	acs	0.61	0.293	1.64	3.41
acs06100	2/3/99	acs	0.61	0.342	1.64	2.92
acs06101	2/3/99	acs	-	0.366	-	2.73
acs06104	2/3/99	acs	0.61	-	1.64	-
acs06105	2/3/99	acs	0.61	-	1.64	-
acs06106	2/3/99	acs	0.61	-	1.64	-
acs06107	2/3/99	acs	0.635	-	1.57	-
acs06201	3/3/99	acs	0.61	0.391	1.64	2.56
acs06202	3/3/99	acs	0.61	0.366	1.64	2.73
acs06205	3/3/99	acs	-	0.366	-	2.73
acs06206	3/3/99	acs	0.61	-	1.64	-
acs06209	3/3/99	acs	0.635	0.293	1.57	3.41
acs0620A	3/3/99	acs	0.61	-	1.64	-
acs0620B	3/3/99	acs	0.61	-	1.64	-
acs0620C	3/3/99	acs	0.659	0.342	1.52	2.92
acs0620D	3/3/99	acs	0.659	0.391	1.52	2.56
acs0620K	3/3/99	acs	0.61	0.366	1.64	2.73
acs0620M	3/3/99	acs	0.61	-	1.64	-
acs06300	4/3/99	acs	0.61	0.317	1.64	3.15
acs07400	15/3/99	acs	-	0.391	-	2.56
acs07401	15/3/99	acs	-	0.366	-	2.73
acs07402	15/3/99	acs	-	0.366	-	2.73
acs07700	18/3/99	acs	-	0.366	-	2.73
acs07701	18/3/99	acs	-	0.366	-	2.73
acs08800	29/3/99	acs	-	0.366	-	2.73
acs08801	29/3/99	acs	0.61	-	1.64	-
acs08802	29/3/99	acs	-	0.342	-	2.92
acs08803	29/3/99	acs	0.635	0.342	1.57	2.92
acs08804	29/3/99	acs	0.61	0.366	1.64	2.73
acs09201	2/4/99	acs	-	0.366	-	2.73
acs09600	6/4/99	acs	0.61	0.391	1.64	2.56
acs09601	6/4/99	acs	-	0.391	-	2.56
acs09603	6/4/99	acs	-	0.366	-	2.73
acs09604	6/4/99	acs	-	0.391	-	2.56
acs09605	6/4/99	acs	0.61	0.366	1.64	2.73
acx19201	11/7/99	acx	-	0.366	-	2.73
acx19300	12/7/99	acx	0.61	0.366	1.64	2.73
acx19301	12/7/99	acx	-	0.366	-	2.73
acx19302	12/7/99	acx	-	0.366	-	2.73
acx20100	20/7/99	acx	-	0.366	-	2.73
acs23800	26/8/99	acs	0.635	-	1.57	-
acs23900	27/8/99	acs	0.61	0.342	1.64	2.92
acs24000	28/8/99	acs	0.61	-	1.64	-
acs24300	31/8/99	acs	0.61	-	1.64	-
n1324700	4/9/99	n13	0.61	-	1.64	-
n1300500	5/10/99	n13	-	0.366	-	2.73
n1301400	14/10/99	n13	0.61	-	1.64	-
acs05802	27/2/00	acs	-	0.342	-	2.92
acx05802	27/2/00	acx	-	0.342	-	2.92
acs06801	9/3/00	acs	-	0.342	-	2.92
acx06801	9/3/00	acx	-	0.342	-	2.92
Aes17302	22/6/00	acs	-	0.366	-	2.73

Para el caso del edificio en estudio, fue necesario contar con registros cuya duración fuera superior a 17 segundos de acuerdo al inciso 4.2, ya que las frecuencias fundamentales en las direcciones transversal y longitudinal se encuentran cercanas a 0.30 Hz y 0.60 Hz respectivamente, por lo que de acuerdo a la figura 4.2, se requieren 3334 y 1667 muestras para las frecuencias de 0.3 Hz y 0.6 Hz respectivamente.

De los resultados anteriores, se puede observar que existen variaciones en los valores de frecuencia y periodo en las etapas antes y después del refuerzo. La ampliación de la banda de frecuencias y periodos de la estructura en la etapa del refuerzo, es debido a la naturaleza de estos

trabajos, en los cuales se modificaban las cargas gravitacionales a la estructura y se inducían vibraciones en niveles superiores. Para las etapas antes y después del refuerzo se aprecia una reducción de la banda de frecuencias en dirección longitudinal, mientras que en dirección transversal se presenta un corrimiento en dicha banda, que hace evidente el incremento de rigidez en esta dirección de la estructura. En dirección longitudinal existe una disminución de los promedios de los periodos del 4.2 % (de 1.68 s a 1.61 s) y del 9.8 % (de 3.17 s a 2.86 s) en dirección transversal, lo que refleja que el incremento de rigidez en esta dirección es superior al que ocurrió en dirección longitudinal.

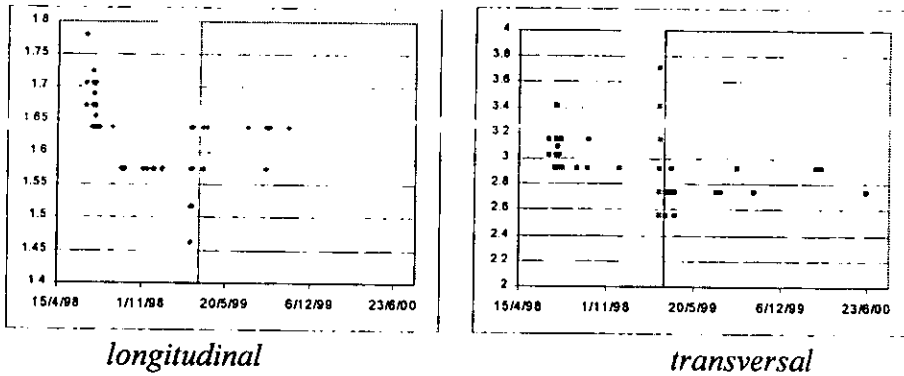


Figura 8.1. Evolución de los periodos en las dos direcciones principales.

8.1.2. Formas modales antes del refuerzo.

Se intentó encontrar las formas modales del edificio a partir de las señales ambientales obtenidas. Es importante mencionar que no todas las señales registradas permitieron estimar los modos de vibrar de la estructura, ya que algunas de estas señales no mostraban amplitudes dominantes en la banda de frecuencias propias de la estructura, valores de fase adecuados o bien, coherencias muy bajas. Con base en lo anterior, para obtener las formas modales antes y después del reforzamiento, se seleccionaron las señales de mayor calidad.

En la tabla 8.3 se presentan las características principales de las señales de vibración ambiental que se utilizaron para obtener las formas modales del edificio. En este tipo de señales no se eliminaron las muestras correspondientes al pre- evento y post-evento, debido a que las amplitudes de aceleración son comparables durante toda la longitud del registro. De la tabla 8.3 se puede observar que la mayor aceleración tiene un valor de 8.38 gals en dirección transversal, valor que apenas rebasa los 6 gals de umbral de disparo para el instrumento de la azotea exterior. Como se vera más adelante, los niveles de aceleración producto de excitaciones sísmicas alcanzan valores de hasta 109 gals.

Tabla 8.3. Señales utilizadas para obtener las formas modales.

Acelerograma	Ubicación	Fecha (meridiano)	Tiempo de disparo (meridiano)	Acel. Pico(gal)			Nº de muestras	Duración del registro (s.)
				Long.	Trans.	Vert.		
1 1730c	Aes	6/22/98	22:43:01.83	1.916	0.958	-	7902	79.02
3 1730c	P13	6/22/98	22:43:01.81	0.958	0.958	-	7902	79.02
5 1730g	P6	6/22/98	22:43:01.81	0.958	0.958	-	5004	50.04
4 1730g	Sótano	6/22/98	22:43:01.81	0.1198	0.2395	-	4902	49.02
Aes16401	Aes	6/13/00	22:46:08.83	1.916	0.958	1.916	7100	71.00
Aex16401	Aex	6/13/00	22:46:07.77	-6586	8.3826	-1.7370	7113	71.13
P1316401	P13	6/13/00	22:46:08.81	0.958	0.958	-	7100	71.00
P6 16401	P6	6/13/00	22:46:08.80	1.437	0.479	-	7100	71.00
Sot16401	Sótano	6/13/00	22:46:08.80	0.2395	0.2395	-	7100	71.00

Para obtener las formas modales antes del refuerzo, se utilizaron las señales del 22 de junio de 1998. Primeramente se obtuvieron las frecuencias dominantes para este evento, en cada uno de los equipos de medición, con este fin se calcularon los espectros de Fourier, espectros cruzados y las funciones de transferencia, fig 8.2. La función de transferencia empleada es el cociente entre los espectros de equipos colocados en niveles superiores y el del sótano. Las frecuencias dominantes para estos espectros se resumen en la tabla 8.4.

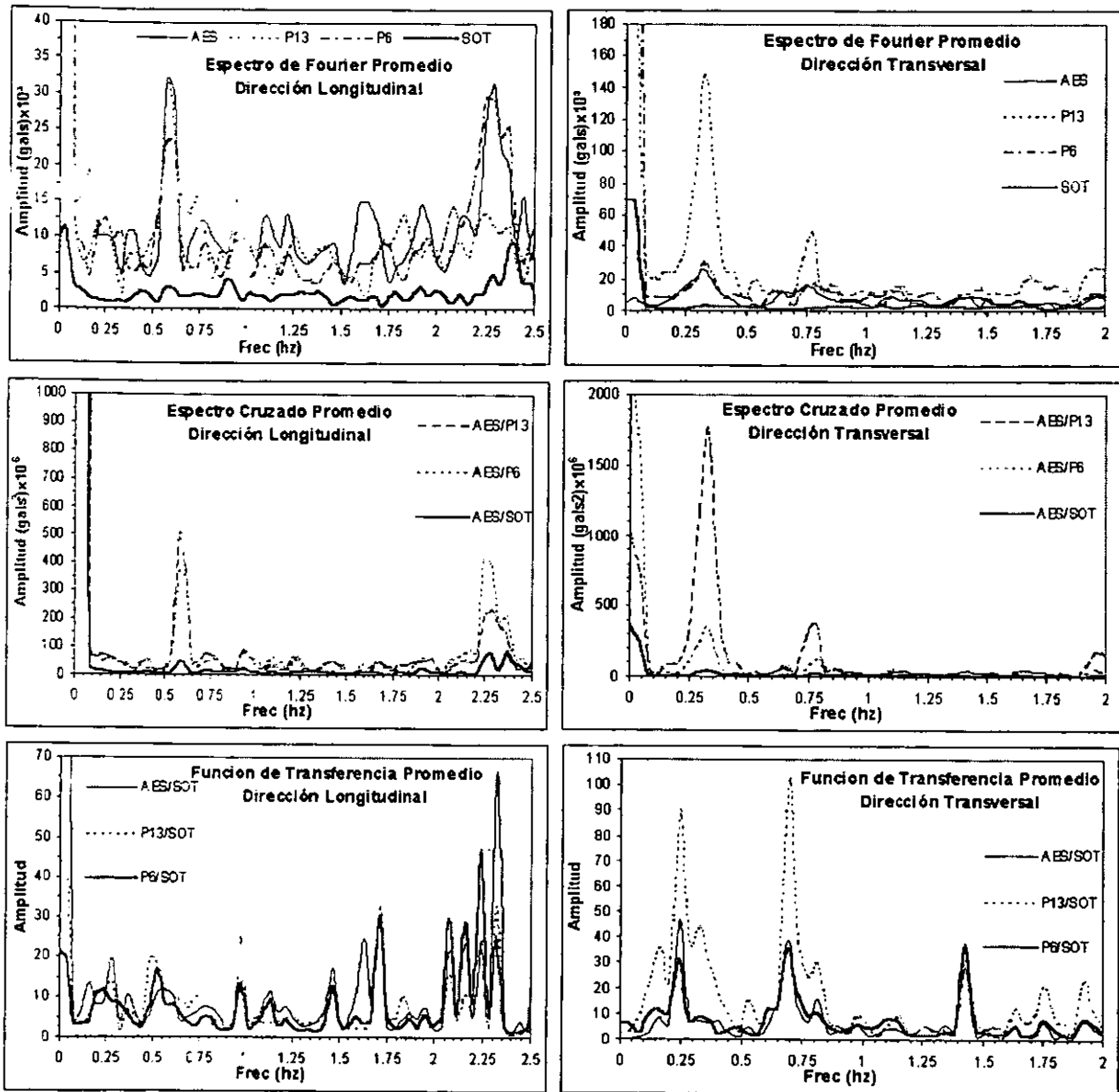


Fig 8.2. Espectros de Fourier, cruzado y de transferencia, para el cálculo de frecuencias.

Observando los espectros anteriores se pueden obtener 3 frecuencias principales en dirección longitudinal: 0.490-0.612 Hz (1.63-2.04 s) y 2.244-2.366 Hz (0.42-0.45 s). En dirección transversal las frecuencias que se identifican son: 0.245-0.326 Hz (3.07-4.08 s) y 0.694-0.775 Hz (1.29-1.44 s). Existe una frecuencia en dirección longitudinal (0.898-0.979 Hz) que tiene poca importancia en los espectros de Fourier y cruzados, y aunque es un poco más definida en las funciones de transferencia, no se considera como frecuencia de la estructura. Para los espectros de Fourier y cruzados que involucran al equipo del sótano, las frecuencias fundamentales no

pueden ser fácilmente apreciadas. Se puede observar, además, que en general la primera frecuencia identificada presenta mayores amplitudes que la segunda, y por tanto una mayor concentración de energía, excepto en las funciones de transferencia, en donde las segundas frecuencias son más importantes.

Tabla 8.4 Frecuencias obtenidas para el 22 de junio de 1998.

Dirección	Con espectros de Fourier(Hz)				Con espectros cruzados(Hz)			Con funciones de transferencia(Hz)		
	Aes	P13	P6	Sot	Aes-p13	Aes-p6	Aes-sot	Aes/sot	P13/Sot	P6/sot
Long.	0.571	0.571	0.612	0.612	0.571	0.571	0.571	0.571	0.490	0.530
Long.	0.938	0.938	0.938	0.898	-	-	-	0.979	0.979	0.979
Long.	2.285	2.244	2.244	2.407	2.285	2.285	2.366	2.326	2.326	2.244
Trans.	0.326	0.326	0.326	-	0.326	0.326	0.326	0.245	0.245	0.245
Trans.	0.734	0.775	0.775	-	0.775	0.775	0.775	0.694	0.694	0.694

Para el cálculo de las formas modales y con el fin de identificar correctamente las frecuencias que corresponden al edificio, se utilizaron las funciones de transferencia respecto al equipo de la azotea, normalizando los valores de amplitud respecto a este, de acuerdo al procedimiento de análisis descrito en el capítulo 7. En dirección longitudinal se obtienen amplitudes para las frecuencias de 0.57 Hz (1.75 s) y 2.24 Hz (0.45 s), mientras que para dirección transversal las frecuencias que se analizan son: 0.25 Hz (4.08 s) y 0.78 Hz (1.29 s). Debe hacerse notar que para las primeras frecuencia se utilizaron promedios de más de 3334 y 1667 muestras para la dirección transversal y longitudinal respectivamente, con el fin de obtener una resolución adecuada de los espectros, de acuerdo a lo indicado en la sección 4.2. En el anexo 1 se presentan las funciones de transferencia, los espectros de fase y de coherencia de los equipos en sus dos direcciones ortogonales, estos valores se resumen en la tabla 8.5.

Tabla 8.5. Valores para el cálculo de los 2 primeros modos antes del refuerzo.

Espectro	Frec(Hz)	aes/P13	Aes/P6	aes/sot	(Transfer) ⁻¹ por nivel			
					22	13	6	0
Transfer.	0.57	1.03	1.41	11.89	1.00	0.97	0.71	-0.08
Fase		22.13	-25.00	103.88				
Coherencia		0.79	0.55	0.00				
Transfer.	2.24	1.76	0.81	24.40	1.00	-0.57	-1.23	0.04
Fase		-129.65	120.54	37.00				
Coherencia		0.36	0.11	0.57				
Transfer.	0.25	1.28	1.96	12.79	1.00	0.78	0.51	-0.08
Fase		31.27	-10.30	-108.86				
Coherencia		0.73	0.97	0.10				
Transfer.	0.78	0.34	1.22	21.68	1.00	2.94	0.82	-0.05
Fase		45.84	-78.19	-75.59				
Coherencia		0.49	0.04	0.06				

Con base en los valores presentados, se puede observar que para las frecuencias identificadas, los valores de coherencias son en general bajos, sin embargo, los valores de fase y transferencia se consideraron adecuados para obtener las formas modales en las dos direcciones principales, fig 8.3.

Se puede observar que las frecuencias en dirección longitudinal, corresponden efectivamente a los dos primeros modos. En dirección transversal la primera frecuencia, corresponde al primer modo, pero la segunda frecuencia identificada parece no corresponder al segundo modo, esto es reflejo de las bajas coherencias obtenidas y los espectros de fases poco precisos. Sin embargo, como se verá al analizar las vibraciones forzadas, el segundo modo transversal está asociado a frecuencias cercanas a 0.90 Hz, lo que hace pensar que esta puede ser la segunda frecuencia del edificio en dirección transversal

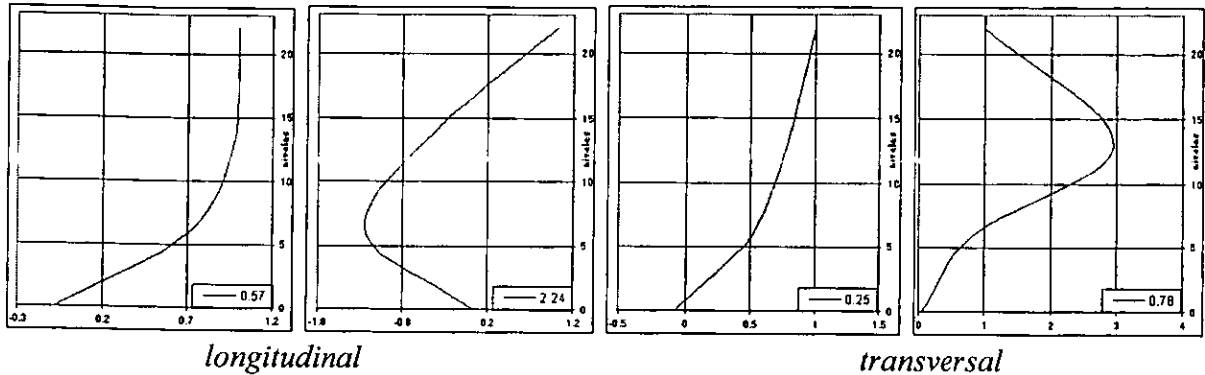


Fig 8.3. Formas modales antes del refuerzo.

El cálculo del amortiguamiento que experimentó el edificio bajo esta excitación se realizó en función de los espectros de potencia de las señales sísmicas registradas para el evento (fig 8.4), utilizando el método de Kawasumi y Shima (1965), obteniéndose valores de 2.8 % y 7.1 % para las direcciones longitudinal y transversal del edificio respectivamente en el primer modo.

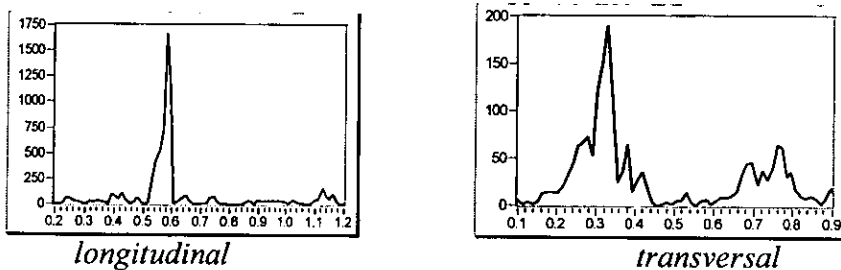


Fig 8.4. Espectros de potencia para el cálculo del amortiguamiento.

8.1.2. Formas modales después del refuerzo.

Para obtener las formas modales después del refuerzo, se utilizaron las señales del 13 de junio del 2000. De la misma forma como se realizó el análisis de la etapa antes del refuerzo, se obtuvieron los espectros de Fourier, espectros cruzados y las funciones de transferencia, fig 8.5. La función de transferencia empleada es el cociente entre los espectros de equipos colocados en niveles superiores y el del sótano. Las frecuencias dominantes para estos espectros se resumen en la tabla 8.6.

Observando los espectros de la fig 8.4, se pueden obtener 3 frecuencias principales en dirección longitudinal: 0.550-0.634 Hz (1.58-1.82 s), 0.676 Hz (1.48 s) y 2.282-2.536 Hz (0.39-0.44 s). En dirección transversal las frecuencias que se identifican son: 0.338-0.423 Hz (2.36-2.96 s) y 0.845-

1.184 Hz (0.84-1.18 s). Existe una frecuencia (0.676 Hz) que únicamente es identificada en las funciones de transferencia, y por lo tanto no es considerada como frecuencia de la estructura. Se puede observar que en general la primera frecuencia identificada presenta mayores amplitudes que la segunda, y por tanto una mayor concentración de energía, excepto en las funciones de transferencia en dirección transversal, en donde las segundas frecuencias son más importantes.

Tabla 8.6 Frecuencias obtenidas para el 13 de junio del 2000.

Dirección	Con espectros de Fourier(Hz)				Con espectros cruzados(Hz)			Con funciones de transferencia(Hz)		
	Aes	P13	P6	Sot	Aes-p13	Aes-p6	Aes-sot	Aes/sot	P13/Sot	P6/sot
Long.	0.592	0.592	0.634	0.634	0.592	0.592	0.592	0.550	0.550	0.550
Long.	-	-	-	-	-	-	-	0.676	0.676	0.676
Long.	2.283	-	2.536	-	2.283	2.283	-	2.282	2.282	2.282
Trans.	-	-	-	-	-	-	-	0.197	0.197	0.197
Trans.	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.423	0.423	0.423
Trans.	0.845	0.845	0.845	0.874	0.845	0.845	-	1.184	1.184	1.184

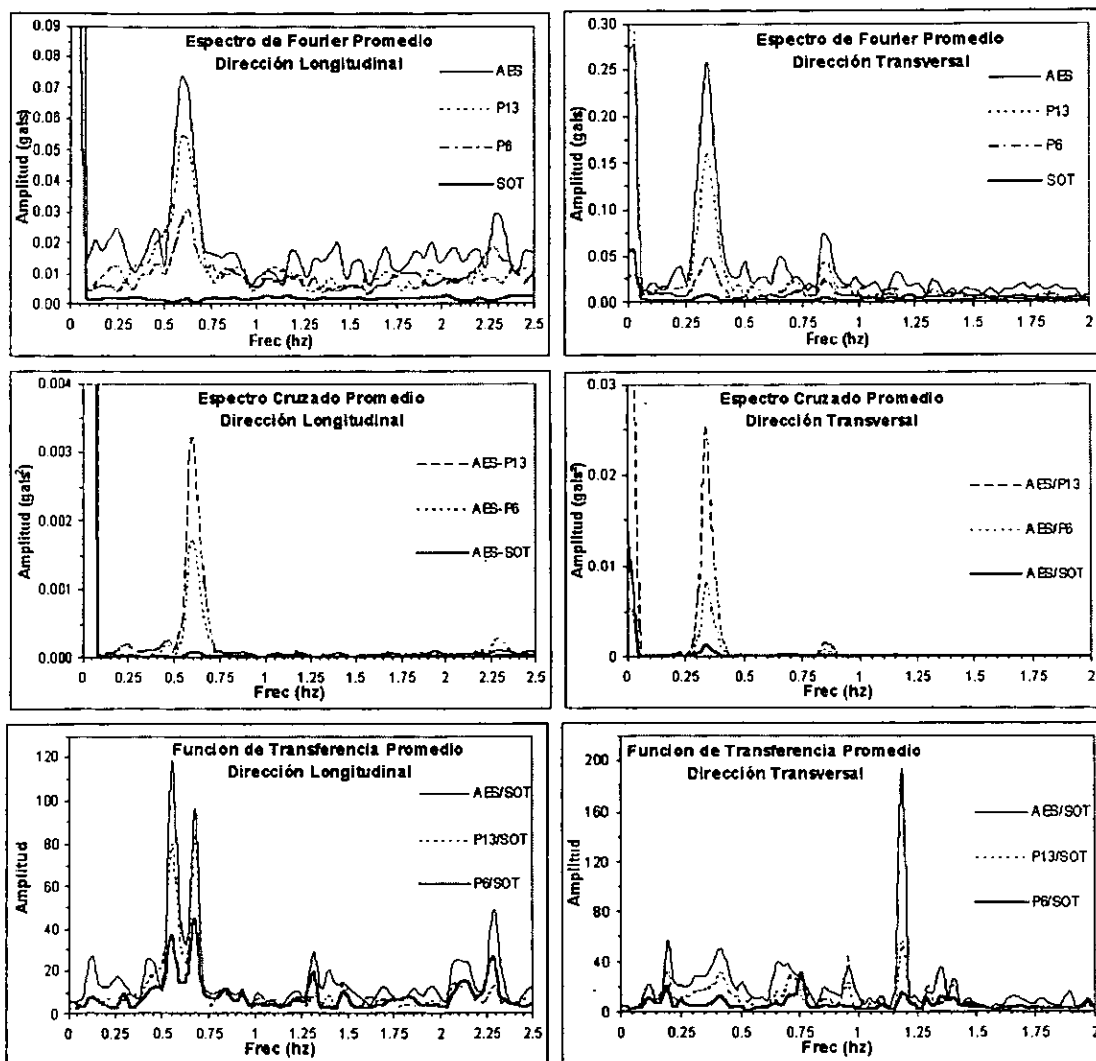


Fig 8.5. Espectros de Fourier, cruzado y de transferencia, para el cálculo de frecuencias.

Para el cálculo de las formas modales y con el fin de identificar correctamente las frecuencias que corresponden al edificio, se utilizaron las funciones de transferencia respecto al equipo de la azotea, normalizando los valores de amplitud respecto a este, de acuerdo al procedimiento de análisis descrito en el capítulo 7. En dirección longitudinal se obtiene amplitudes para las frecuencias de 0.57 Hz (1.75 s) y 2.24 Hz (0.45 s), mientras que para dirección transversal las frecuencias que se analizan son: 0.25 Hz (4.08 s) y 0.78 Hz (1.29 s). En el anexo 1 se presentan las funciones de transferencia, los espectros de fase y de coherencia de los equipos en sus dos direcciones ortogonales, estos valores se resumen en la tabla 8.7.

Tabla 8.7. Valores para el cálculo de los 2 primeros modos después del refuerzo.

Espectro	Frec(Hz)	aes/P13	Aes/P6	aes/sot	(Transfer) ⁻¹ por nivel			
					22	13	6	0
Transfer.	0.59	1.396	3.48	46.66	1.00	0.72	0.29	0.02
Fase		-9.79	-7.22	-25.24				
Coherencia		0.95	0.94	0.74				
Transfer.	2.28	4.44	2.30	48.56	1.00	-0.23	-0.43	0.02
Fase		-162.47	156.23	-20.23				
Coherencia		0.15	0.72	0.09				
Transfer.	0.34	1.618	5.91	27.93	1.00	0.62	0.17	0.04
Fase		3.15	1.89	12.21				
Coherencia		1.00	0.98	0.93				
Transfer.	0.85	1.80	3.60	19.13	1.00	0.56	0.28	0.05
Fase		-1.97	-1.51	12.14				
Coherencia		0.98	0.99	0.82				

Con base en los valores presentados, se puede observar que para las frecuencias identificadas, los valores de coherencias son en general bajos, sin embargo, los valores de fase y transferencia se consideraron adecuados para obtener las formas modales en las dos direcciones principales, fig 8.6.

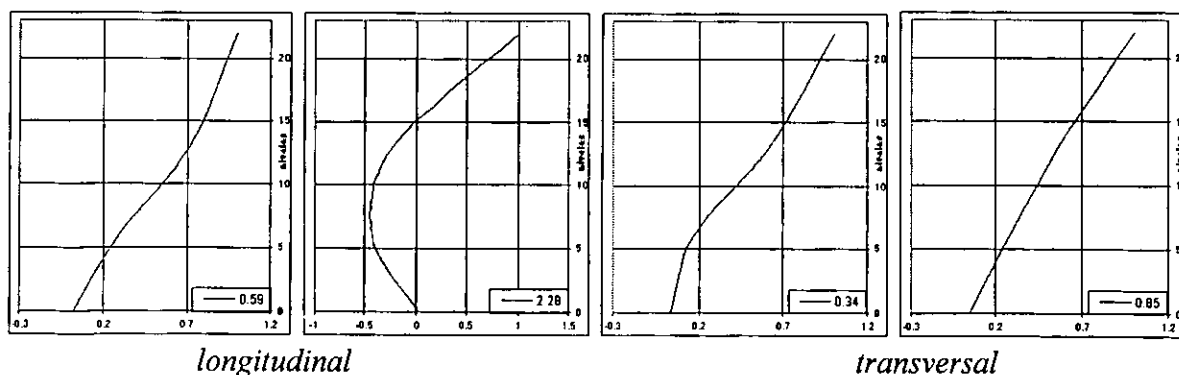


Fig 8.6. Formas modales después del refuerzo.

El cálculo del amortiguamiento que experimentó el edificio bajo esta excitación, se realizó en función de los espectros de potencia de las señales registradas (fig 8.7), utilizando el método de Kawasumi y Shima (1965), obteniéndose valores de 3.6 % y 4.6 % para las direcciones longitudinal y transversal del edificio respectivamente en el primer modo.



Fig 8.7. Espectros de potencia para el cálculo del amortiguamiento.

Se puede observar que las frecuencias en dirección longitudinal, corresponden efectivamente a los dos primeros modos. En dirección transversal la primer frecuencia corresponde al primer modo, pero al igual que las formas modales antes del reforzo, la segunda frecuencia identificada parece no corresponder al segundo modo, a pesar de las coherencias altas para esta frecuencia. Sin embargo, como se verá al analizar las vibraciones forzadas, el segundo modo transversal está asociado a frecuencias cercanas a 0.90 Hz, lo que hace pensar que esta puede ser la segunda frecuencia del edificio en dirección transversal

Como pudo observarse, la estimación de las formas modales empleando registros de vibración ambiental, resulta poco precisa, ya que los niveles de aceleración alcanzados en este tipo de señales y, por ende, los movimientos de la estructura, son poco significativos.

Por el contrario, como se verá en el siguiente inciso, cuando los desplazamientos en una estructura son apreciables, producen espectros con coherencias altas y valores de fase bien definidos, lo cual permite estimar de mejor manera las formas modales.

8.2. Estudio de vibraciones forzadas.

Después del reforzamiento de la estructura, el sistema de monitoreo instalado en el edificio ha registrado 6 eventos sísmicos de importancia en la ciudad de México, cuyas características se presentan en la tabla 8.8. Es importante mencionar que de los 6 eventos sísmicos registrados, solo dos de ellos han excitado de manera importante a la estructura: el del 15 de Junio y el del 30 de Septiembre de 1999.

Para todas estas señales registradas, fue posible identificar claramente las frecuencias fundamentales de vibrar en dos direcciones ortogonales, sus correspondientes formas modales y el porcentaje de amortiguamiento crítico en la estructura.

Tabla 8.8. Características de los sismos analizados.

Fecha	Origen	Latitud norte	Longitud oeste	Profundidad	Magnitud
15/06/99	Puebla v Oaxaca	18.39 grados	-97.44 grados	70 kms.	6.7 Mw
21/06/99	Costas de Oaxaca.	18.32	-101.54	68	6.2 Mw
30/09/99	Costas de Oaxaca.	16.06	-96.93	60	7.4 Mw
28/12/99	Costas de Oaxaca.	18.24	-101.43	20	5.9 Mw
21/07/00	Puebla v Morelos	18.09	-98.97	47	5.9 Mw
09/08/00	Costas de Guerrero v Michoacán	17.94	-102.71	9	6.4 Mw

En la tabla 8.9 se presentan las características principales de las señales sísmicas registradas en los 5 equipos de medición instalados en el edificio. En las figs. 8.8 y 8.9 se presentan las componentes horizontales (en dirección longitudinal y transversal del edificio) de los registros de

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

aceleraciones generados por los eventos sísmicos de la tabla 8.8. Para observar la amplificación de estas señales en la altura del edificio, los registros fueron graficados a la misma escala y ubicados en el nivel del edificio correspondiente.

En los acelerogramas correspondientes a la dirección longitudinal, se observa que existe un incremento en las aceleraciones conforme se incrementa la altura del equipo de medición respecto al nivel del terreno; esto hace pensar que el comportamiento de la estructura en esta dirección esta gobernado por el primer modo de vibrar. Sin embargo en la dirección transversal esto no sucede, ya que en el nivel 6 se obtuvieron aceleraciones más grandes que las que ocurren en el nivel 13, lo que puede atribuirse a la participación de modos superiores en el comportamiento dinámico de la estructura.

De la tabla 8.9 se observa que las aceleraciones máximas fueron ocasionadas por el sismo del 30 de septiembre de 1999 y registradas en el instrumento colocado en la azotea exterior, con valores de 109 gals y de 76 gals en dirección transversal y longitudinal respectivamente. El evento que produjo las menores aceleraciones fue el sismo del 29 de diciembre de 1999 con una aceleración máxima registrada en la azotea-escalera de 9.6 gals.

Tabla 8.9. Datos de las señales analizadas

Acelerograma	Ubicación	Fecha (meridiano)	Tiempo de disparo (meridiano)	Acel. Pico(gal)			Nº de muestras	Duración del registro (s.)
				Long.	Trans.	Vert.		
Aex16601	Azot-ext	15/06/99	20:42:45.79	-48.9183	-100.5908	-20.2978	22.452	174.52
Aes16601	Azot-esc	15/06/99	20:42:45.82	-45.0263	-65.1445	20.1182	22.514	175.14
P1316602	Piso 13	15/06/99	20:42:45.80	24.4292	39.7573	-	22.514	175.14
P6 16601	Piso 6	15/06/99	20:42:45.79	17.7231	64.6655	-	22.516	175.16
Sot16602	Sotano	15/06/99	20:42:45.14	22.5132	22.8724	-9.2208	22.581	175.81
Aex17200	Azot-ext	21/06/99	17:44:18.28	-16.1664	16.4658	3.0536	11.785	67.85
Aes17200	Azot-esc	21/06/99	17:44:18.83	13.4127	10.5381	-3.8320	11.804	68.04
P1317200	Piso 13	21/06/99	17:44:18.80	8.1431	5.7480	-	11.804	68.04
P6 17200	Piso 6	21/06/99	17:44:18.80	5.7480	-9.5801	-	11.804	68.04
Sot17200	Sotano	21/06/99	17:44:18.80	-4.5505	4.4308	-1.7963	11.804	68.04
Aex27300	Azot-ext	30/09/99	16:32:39.26	-76.2011	-108.7038	-12.7535	24.276	192.76
Aes27300	Azot-esc	30/09/99	16:32:39.82	67.0605	66.1025	-13.4121	24.316	193.16
P1327300	Piso 13	30/09/99	16:32:39.80	-38.3203	34.0093	-	24.316	193.16
P6 27300	Piso 6	30/09/99	16:32:39.80	-29.6982	-68.4976	-	24.318	193.18
Sot27300	Sotano	30/09/99	16:32:39.41	15.4479	-22.6329	5.6283	24.357	193.57
Aex06000	Azot-ext	29/12/99	05:21:16.00	9.1011	-8.9813	-1.7364	7.561	25.61
Aes06000	Azot-esc	29/12/99	05:21:16.82	9.5801	4.7900	2.8740	7.502	25.02
P1306000	Piso 13	29/12/99	05:21:16.80	5.748	3.832	-	7.502	25.02
P6 06000	Piso 6	29/12/99	05:21:16.80	-3.353	5.2690	-	7.502	25.02
Sot06000	Sotano	29/12/99	05:21:16.80	2.3950	2.3950	0.9580	7.502	25.02
Aex20200	Azot-ext	21/07/00	06:14:03.02	-17.1244	31.4346	-8.5622	13.397	83.97
Aes20200	Azot-esc	21/07/00	06:14:02.85	17.2441	16.2861	8.6221	13.505	85.05
P1320200	Piso 13	21/07/00	6:14:03.79	8.6221	-10.0591	-	13.480	84.80
P6 20200	Piso 6	21/07/00	6:14:03.79	9.1011	18.2021	-	13.410	84.10
Sot20200	Sotano	21/07/00	6:14:02.97	-6.2271	6.4666	-4.1913	13.490	84.90
Aex22100	Azot-ext	9/08/00	11:43:29.38	20.3080	-31.7030	-3.5327	17.251	122.51
Aes22100	Azot-esc	9/08/00	11:43:29.82	22.9922	19.1601	4.7900	17.210	122.10
P1322100	Piso 13	9/08/00	11:43:29.79	14.8491	11.9751	-	17.208	122.08
P6 22100	Piso 6	9/08/00	11:43:29.79	9.1011	-17.2441	-	17.212	122.12
Sot22100	Sotano	9/08/00	11:43:29.79	6.2271	5.6283	2.3950	17.212	122.12

Al igual que las señales de origen ambiental, las señales obtenidas de vibración sísmica contiene muestras de pre y post-evento, con las cuales se puede referenciar la magnitud de aceleraciones que ocurren antes de que se supere el umbral de aceleraciones, y después que ha ocurrido el evento. Para analizar las señales sísmicas, se decidió eliminar las muestras de pre y post-evento.

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

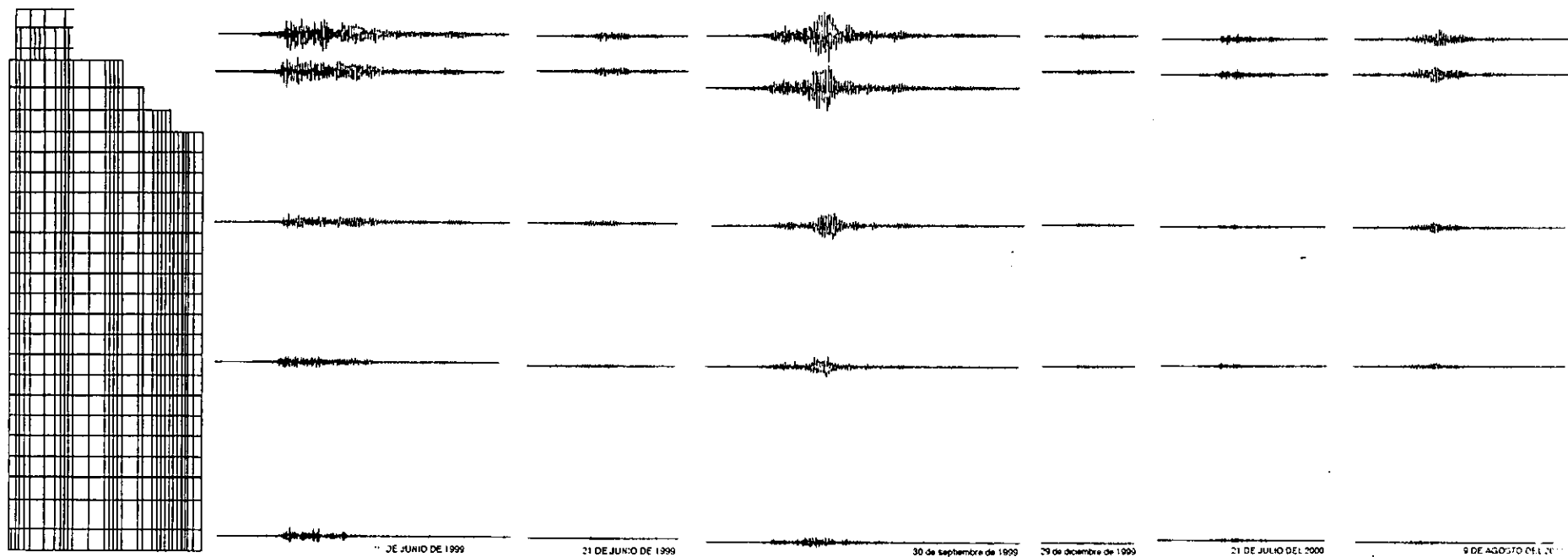


Figura 8.8. Acelerogramas en dirección longitudinal.

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

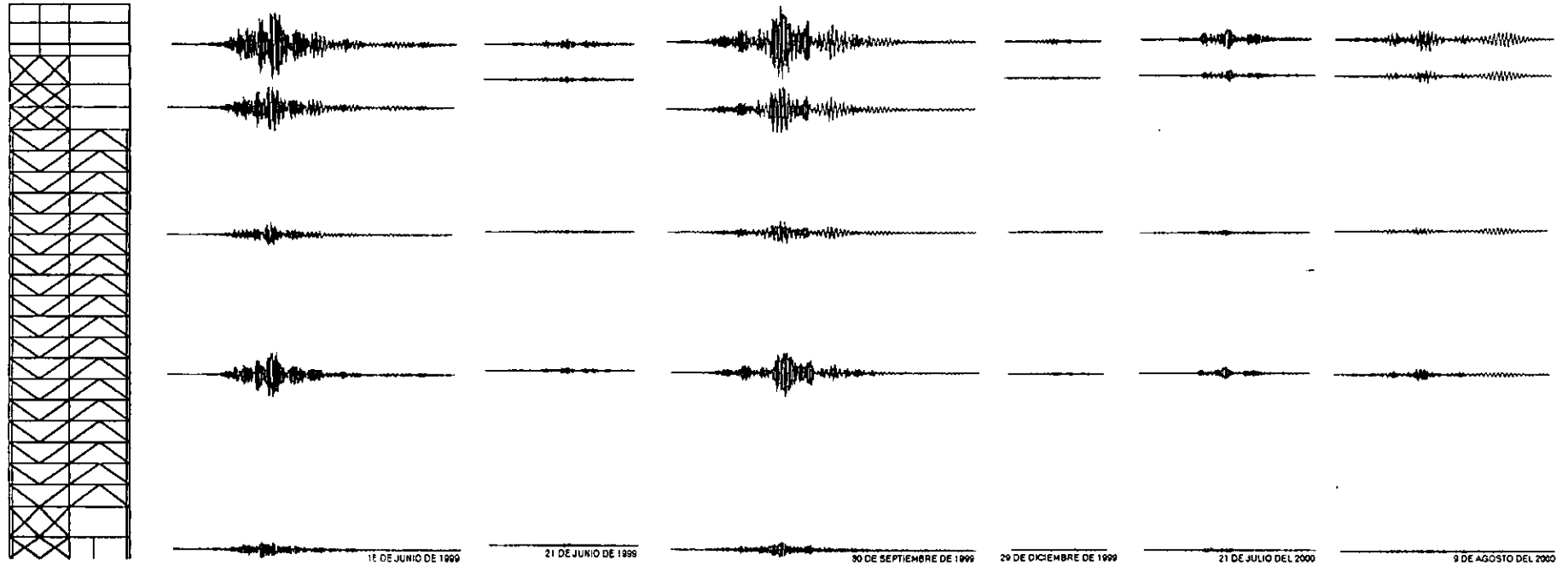


Figura 8.9. Acelerogramas en dirección transversal.

Para realizar el análisis de las señales fue necesario sincronizar los registros, ya que el disparo en los equipos presentó diferencias de décimas de segundo, como se puede observar en la tabla 8.9.

Como un primer análisis de las propiedades dinámicas de la estructura, se obtuvieron los espectros de Fourier de los 6 sismos estudiados en esta tesis, fig 8.10.

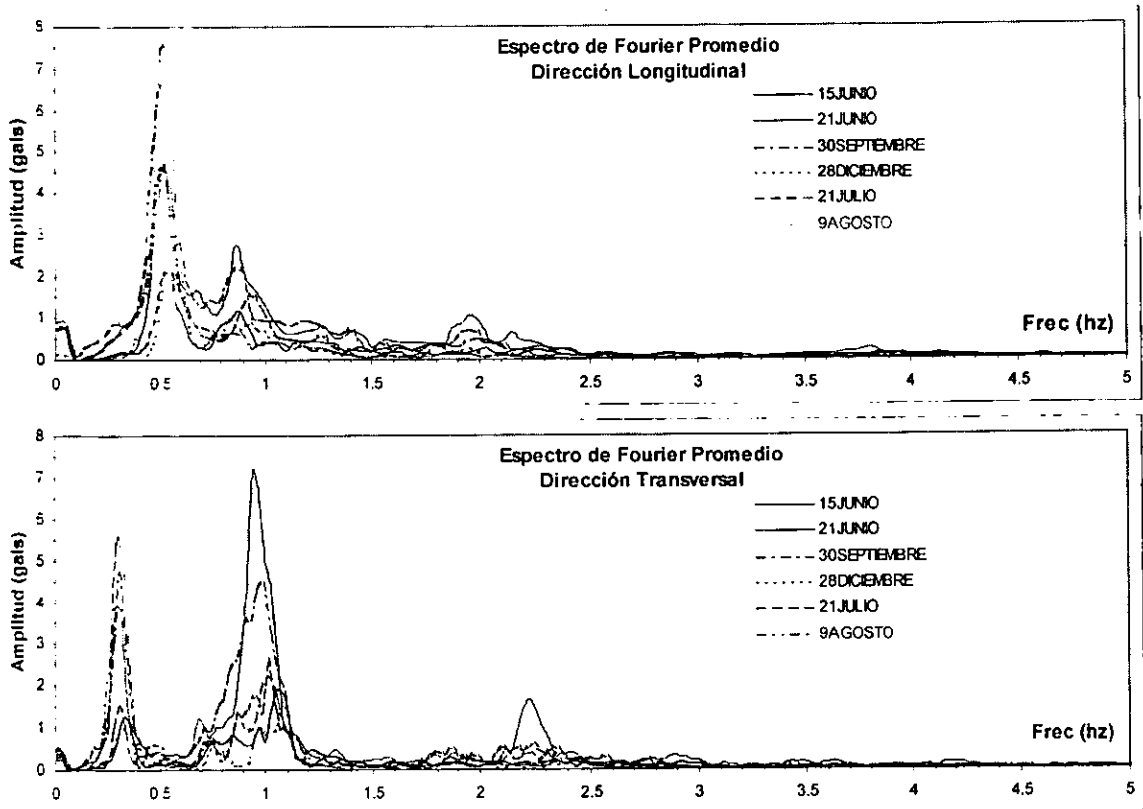


Figura 8.10. Espectros de Fourier del equipo de azotea-escalera para los 6 sismos analizados.

De acuerdo a la figura anterior las frecuencias de la estructura inferiores a 3.0 son las que dominan el comportamiento sísmico del edificio, por lo que es adecuado estudiar únicamente las primeras frecuencias y modos de vibrar si se desea tener una buena aproximación de sus propiedades dinámicas reales. Debido a lo anterior en este estudio se analizan únicamente las 2 primeras frecuencias del edificio en cada dirección.

8.2.1. Sismo del 15 de junio de 1999.

El 15 de junio de 1999 se originó un sismo intenso en los límites entre Puebla y Oaxaca de magnitud 6.7 grados en la escala de Richter (Mw), que por sus características causó severo daño en estructuras de mampostería en varias ciudades de Puebla y fue sentido de manera importante en la ciudad de México.

El evento fue registrado en el edificio de la ex CONASUPO. De las inspecciones realizadas al edificio, se pudo observar que no hubo daño en su estructura y que los disipadores no presentaban evidencia de haber tenido desplazamiento relativo y mucho menos de haber alcanzado su resistencia de fluencia, por lo que, se pudo concluir que para este evento sísmico no hubo trabajo de disipación por parte de los dispositivos.

Para el cálculo de las frecuencias se utilizaron tres tipos de espectros, el de amplitudes de Fourier, el espectro cruzado y la función de transferencia, fig 8.11. Para esta última se obtuvo el cociente entre los espectros de potencia correspondientes a las señales registradas en pisos superiores, respecto a los obtenidos en el sótano. Es importante mencionar que estos valores de frecuencia consideran el movimiento conjunto del suelo y el edificio, es decir, el efecto de interacción suelo-estructura, ya que no se dispuso de ningún instrumento en el campo libre.

Al observar los espectros de Fourier, espectros cruzados y funciones de transferencia de las señales registradas en las 5 estaciones de medición, se pueden identificar las frecuencias del edificio de manera preliminar, tabla 8.10. Estos valores serán corroborados al obtener los espectros de fase y coherencia, los cuales son obtenidos a su vez para encontrar las formas modales correspondientes a estas frecuencias.

Observando los espectros de Fourier o los espectros cruzados se pueden obtener 2 frecuencias principales en dirección longitudinal: 0.502 Hz (1.99 s) y 0.868 Hz (1.15 s). En dirección transversal las frecuencias que se identifican son: 0.285-0.314 Hz (3.18-3.51s) y 0.942-0.971 Hz (1.03-1.06 s). Para estos espectros, la segunda frecuencia identificada en dirección transversal, es la que presenta mayores amplitudes y por tanto una mayor concentración de energía. Adicionalmente se pudo observar que para el equipo del sótano, las frecuencias fundamentales no pueden ser fácilmente apreciadas debido a su baja amplitud.

Tabla 8.10. Frecuencias obtenidas para el sismo del 15 de junio de 1999.

Dirección	Con espectros de Fourier(Hz)					Con espectros cruzados(Hz)				Con funciones de transferencia(Hz)			
	Aes	Aex	P13	P6	Sot	Aes-aex	Aes-p13	Aes-p6	Aes-sot	Aes/sot	Aex/sot	P13/sot	P6/sot
Long.	0.502	0.502	0.502	0.502	-	0.502	0.502	0.502	-	0.548	0.548	0.548	0.548
Long.	0.868	0.868	0.868	-	0.868	0.868	0.868	0.868	0.868	-	-	-	-
Long.	-	1.005	-	-	-	-	-	-	-	-	1.097	-	-
Long.	1.964	1.964	-	-	-	1.964	-	1.964	-	1.918	1.918	1.918	1.918
Trans.	0.285	0.285	0.285	0.285	-	0.314	0.285	0.285	-	0.314	0.314	0.314	0.314
Trans.	0.942	0.942	0.971	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942	1.026	1.056	1.056	1.056

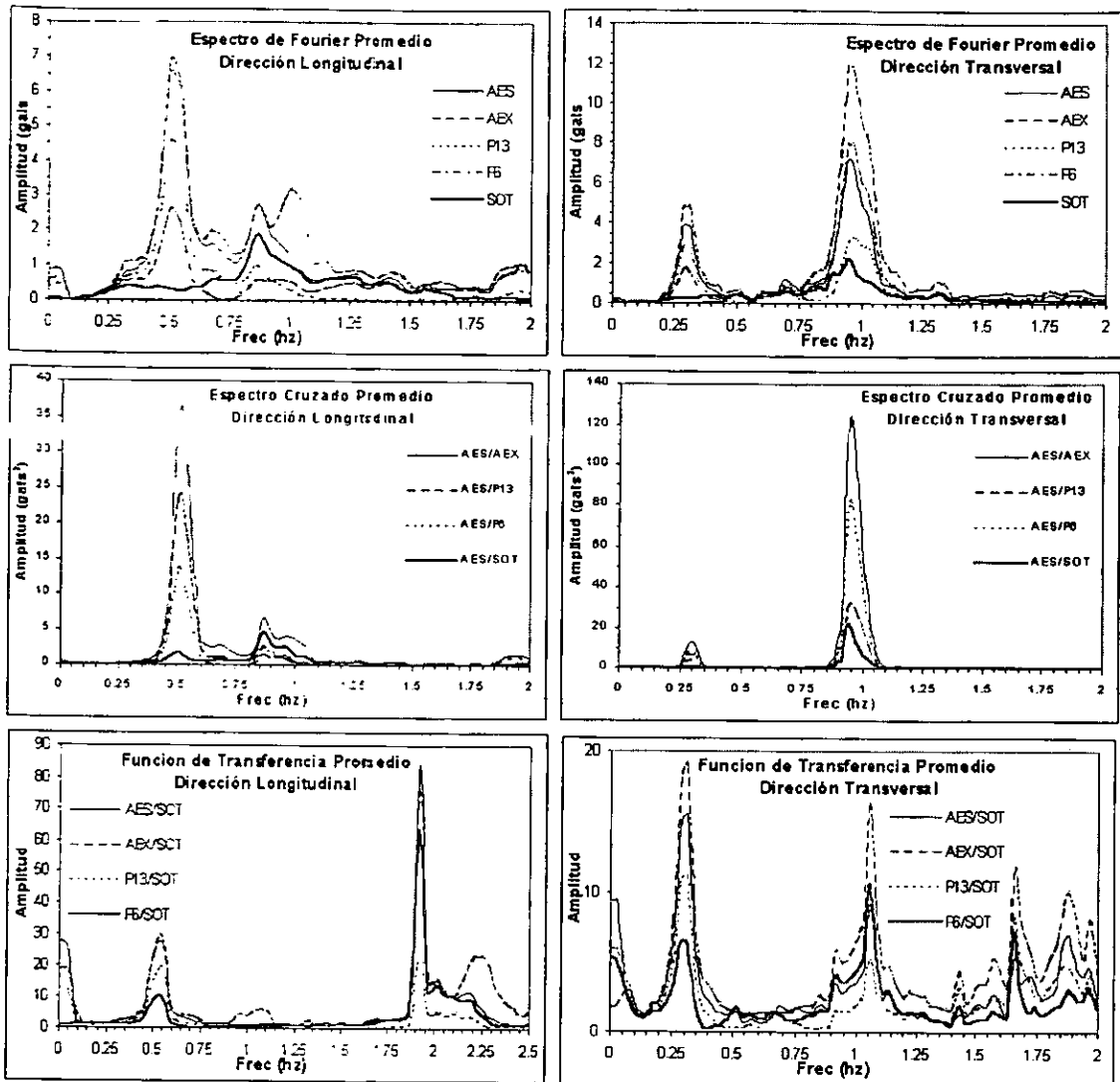


Fig 8.11. Espectros de Fourier, cruzado y de transferencia, para el cálculo de frecuencias.

La segunda frecuencia identificada en dirección longitudinal (0.87 Hz) tiene poca importancia en los espectros de Fourier, y esto es más evidente al observar los espectros cruzados. Además, en las funciones de transferencia no fue posible detectar esta frecuencia, en cambio se puede observar una frecuencia adicional muy bien definida, de 1.918 Hz (0.52 s). El resto de las frecuencias localizadas en los espectros de Fourier y espectros cruzados, si fue posible identificarlas en las funciones de transferencia, lo que verifica que corresponden a frecuencias de vibrar del edificio.

Para el cálculo de las formas modales y con el fin de identificar correctamente las frecuencias que corresponden al edificio, se utilizaron las funciones de transferencia respecto al equipo de la azotea, normalizando los valores de amplitud respecto a este. En el anexo 2 se presentan las funciones de transferencia, los espectros de fase y de coherencia de los 5 equipos en sus dos direcciones ortogonales.

En la tabla 8.11 se presentan los valores de la función de transferencia, fase y coherencia para las frecuencias identificadas. Las frecuencias que presentaron valores de coherencia cercanos a la unidad y fases cercanas a 0° ó 180° , fueron las que se consideraron como frecuencias del sistema. En dirección longitudinal se obtiene valores para las 3 frecuencias identificadas, 0.50 Hz (1.91 s), 0.87 (1.15 s) y 1.92 Hz (0.52 s), mientras que para dirección transversal las frecuencias que se analizan son: 0.30 Hz (3.35 s) y 1.0 Hz (1.0 s).

Tabla 8.11. Valores para el cálculo de los 2 primeros modos del sismo del 15 de junio de 1999.

Espectro	Frec(Hz)	aes/P13	Aes/P6	aes/sot	(Transfer) ⁻¹ por nivel			
					Aes	13	6	sot
Transfer.	0.50	1.43	2.54	22.134	1.00	0.70	0.39	0.05
Fase		-0.02	-3.08	-37.57				
Coherencia		1.00	1.00	0.49				
Transfer.	0.87	2.58	5.22	1.49	1.00	0.39	-0.19	-0.67
Fase		-1.27	-174.98	-177.89				
Coherencia		1.00	0.96	1.00				
Transfer.	1.92	3.04	1.152	84.177	1.00	-0.33	-0.87	-0.01
Fase		172.67	172.93	-147.92				
Coherencia		0.97	0.98	0.29				
Transfer.	0.29	1.35	2.23	14.38	1.00	0.74	0.45	0.07
Fase		-0.11	-1.44	-21.98				
Coherencia		1.00	1.00	0.57				
Transfer.	0.94	2.178	0.83	2.89	1.00	-0.46	-1.20	-0.35
fase		-169.73	-179.21	155.43				
Coherencia		0.97	1.00	0.83				

Con base en los espectros presentados en el anexo 2, se puede observar que para las frecuencias identificadas, los valores de coherencias son en general altos, excepto cuando se relacionan los equipos de la azotea y el sótano en el primer modo, lo cual puede afectar la geometría de la forma modal. Sin embargo, los valores de fase y transferencia se consideran adecuados para obtener las formas modales en las dos direcciones principales, fig 8.12 y 8.13.

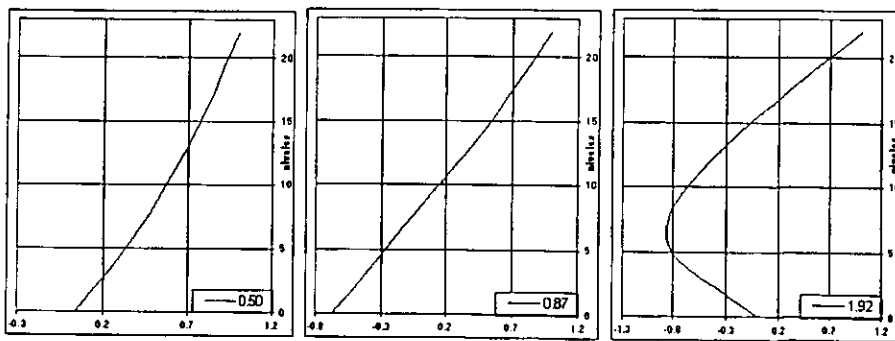


Fig 8.12. formas modales identificadas para las frecuencias en dirección longitudinal.

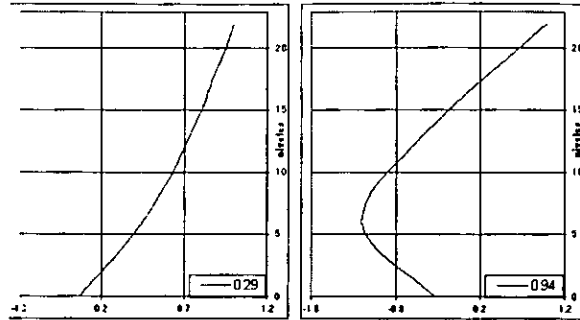


Fig 8.13. formas modales identificadas para las frecuencias en dirección transversal.

En las figuras anteriores se puede ver que la frecuencia de 0.87 Hz (1.15 s) no corresponde una segunda forma modal como se esperaría, por lo que, es posible que esta frecuencia corresponda al periodo del suelo y que la forma modal trazada sólo represente la amplificación de esta frecuencia a través de la estructura.



Figura 8.14. Espectros de potencia en dirección longitudinal y transversal para el cálculo del amortiguamiento.

El cálculo del amortiguamiento que experimentó el edificio bajo esta excitación, se realizó en función de los espectros de potencia de las señales sísmicas registradas para el evento (fig 8.14), utilizando el método de Kawasumi y Shima (1965), obteniéndose valores de 1.3 % y 1.8 % para las direcciones longitudinal y transversal del edificio respectivamente en el primer modo.

8.2.2. Sismo del 21 de junio de 1999.

El 21 de junio de 1999, ocurrió un evento de moderada intensidad (6.2 Mw) en las Costas de Oaxaca. El evento causó ligero daño en las ciudades afectadas por el sismo del 15 de Junio de 1999. Sus efectos fueron sentidos en la ciudad de México, sin embargo, no se reportaron daños estructurales en el edificio de este estudio.

Al igual que para el sismo del 15 de junio, no hubo daño en el edificio y los disipadores no presentaron evidencia de haber tenido desplazamiento relativo. Se realizó un análisis de las frecuencias y los modos de vibrar de la estructura para este evento sísmico, como se detalla a continuación.

El procedimiento utilizado para encontrar las frecuencias correspondientes a la estructura, en las dos direcciones principales del edificio, es el mismo utilizado para el sismo del 15 de junio de 1999. Los espectros de Fourier, espectros cruzados y funciones de transferencia se muestran en la fig 8.15, y los resultados se resumen en la tabla 8.12.

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

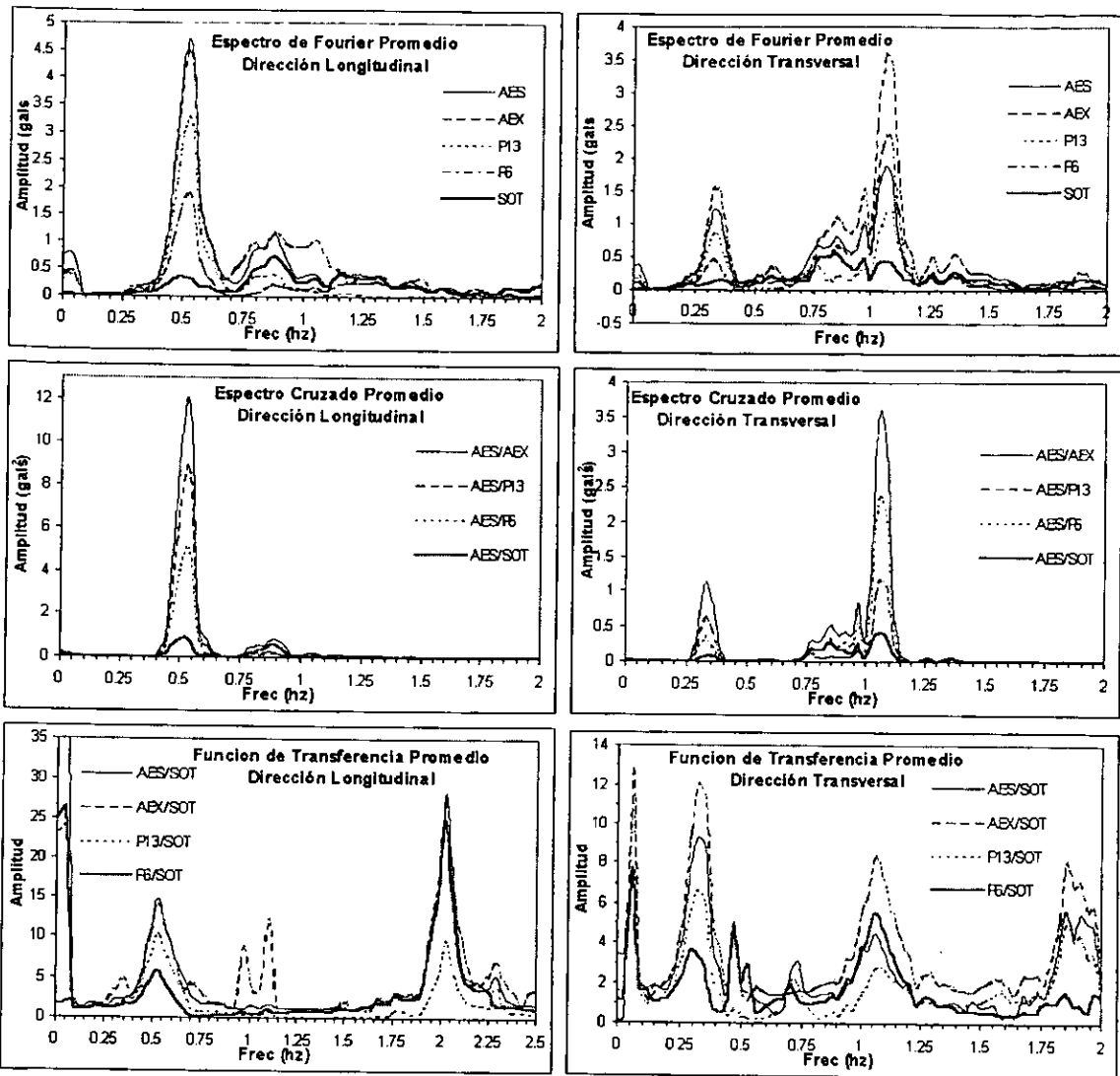


Fig 8.15. Espectros de Fourier, cruzado y de transferencia, para el cálculo de frecuencias.

Observando los espectros de Fourier o los espectros cruzados se pueden obtener 2 frecuencias principales en dirección longitudinal: 0.485-0.529 Hz (1.89-2.06 s) y 0.882 Hz (1.13 s). En dirección transversal las frecuencias que se identifican son: 0.323-0.353 Hz (2.83-3.10s) y 1.058-1.088 Hz (0.92-0.95 s). Para estos espectros, la segunda frecuencia identificada en dirección transversal, es la que presenta mayores amplitudes y por tanto una mayor concentración de energía. Adicionalmente se pudo observar que para el equipo del sótano, las frecuencias fundamentales no pueden ser fácilmente apreciadas debido a su baja amplitud

Al igual que para el sismo del 15 de junio, la segunda frecuencia identificada en dirección longitudinal (0.88 Hz) tiene poca importancia en los espectros de Fourier, y esto es más evidente al observar los espectros cruzados. Además, en las funciones de transferencia no fue posible detectar esta frecuencia, en cambio se puede observar una frecuencia adicional muy bien definida, de 2.028 Hz (0.49 s). El resto de las frecuencias localizadas en los espectros de Fourier y espectros cruzados, si fue posible identificarlas en las funciones de transferencia, lo que verifica que corresponden a frecuencias de vibrar del edificio.

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

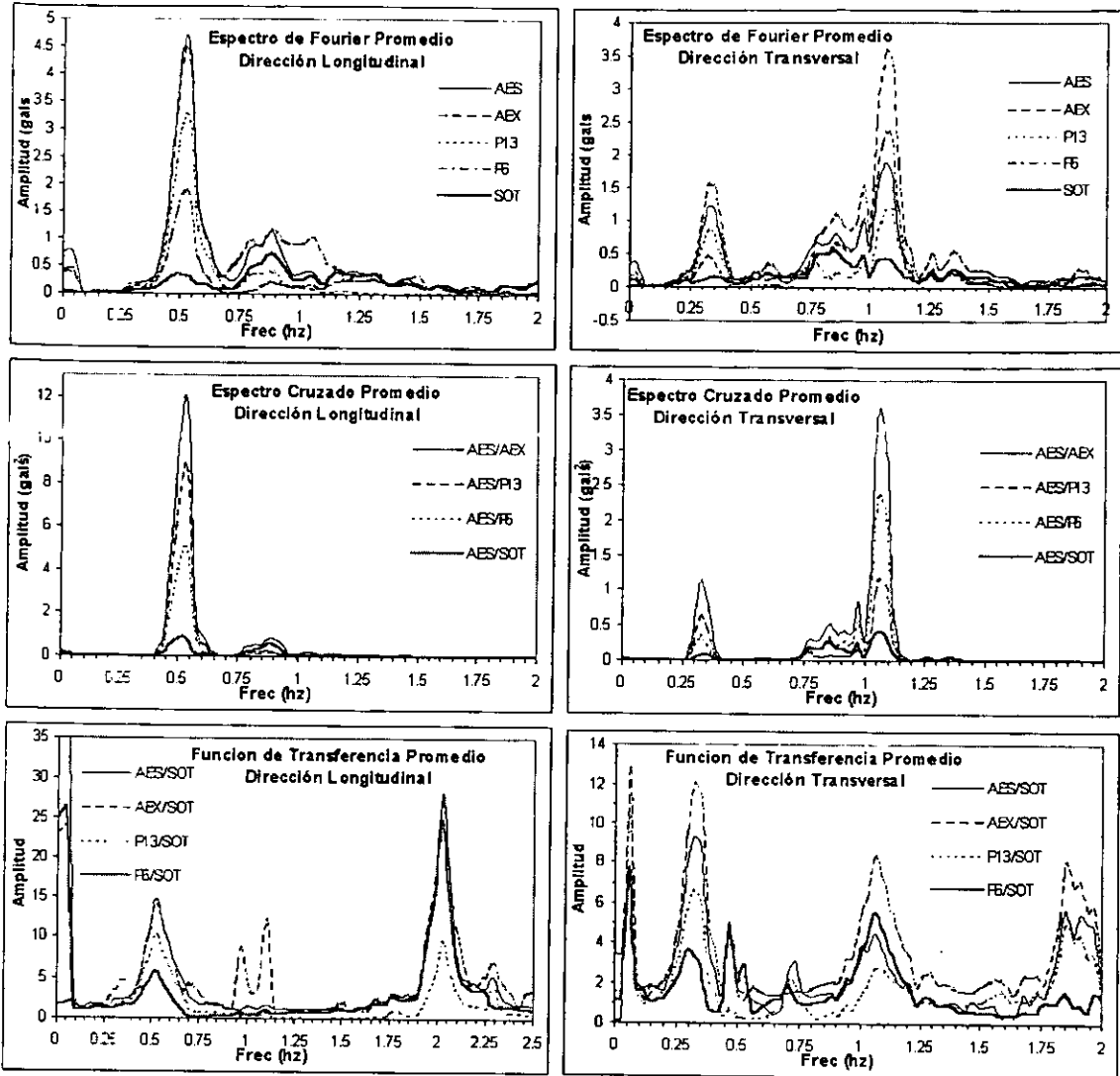


Fig 8.15. Espectros de Fourier, cruzado y de transferencia, para el cálculo de frecuencias.

Observando los espectros de Fourier o los espectros cruzados se pueden obtener 2 frecuencias principales en dirección longitudinal: 0.485-0.529 Hz (1.89-2.06 s) y 0.882 Hz (1.13 s). En dirección transversal las frecuencias que se identifican son: 0.323-0.353 Hz (2.83-3.10s) y 1.058-1.088 Hz (0.92-0.95 s). Para estos espectros, la segunda frecuencia identificada en dirección transversal, es la que presenta mayores amplitudes y por tanto una mayor concentración de energía. Adicionalmente se pudo observar que para el equipo del sótano, las frecuencias fundamentales no pueden ser fácilmente apreciadas debido a su baja amplitud

Al igual que para el sismo del 15 de junio, la segunda frecuencia identificada en dirección longitudinal (0.88 Hz) tiene poca importancia en los espectros de Fourier, y esto es más evidente al observar los espectros cruzados. Además, en las funciones de transferencia no fue posible detectar esta frecuencia, en cambio se puede observar una frecuencia adicional muy bien definida, de 2.028 Hz (0.49 s). El resto de las frecuencias localizadas en los espectros de Fourier y espectros cruzados, si fue posible identificarlas en las funciones de transferencia, lo que verifica que corresponden a frecuencias de vibrar del edificio.

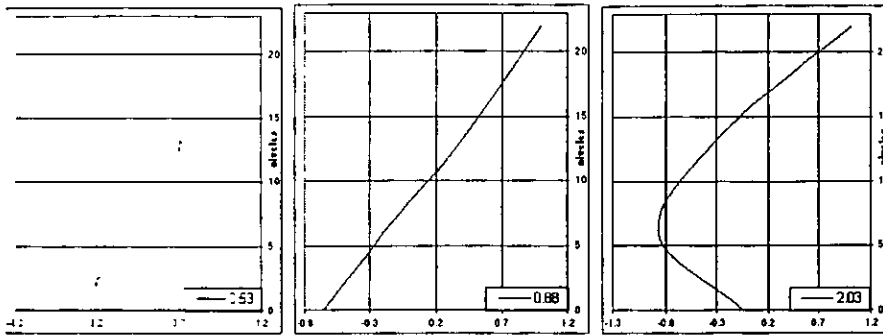


Fig 8.16. formas modales identificadas para las frecuencias en dirección longitudinal.

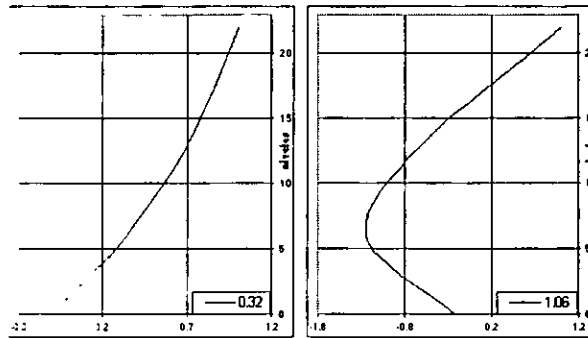


Fig 8.17. formas modales identificadas para las frecuencias en dirección transversal.

En las figuras se puede ver que la frecuencia de 0.88 Hz (1.13 s) no corresponde una segunda forma modal como se esperaría, por lo que, es posible que esta frecuencia corresponda al periodo del suelo y que la forma modal trazada sólo represente la amplificación de esta frecuencia a través de la estructura.

El cálculo del amortiguamiento que experimentó el edificio bajo esta excitación, se realizó en función de los espectros de potencia de las señales sísmicas registradas para el evento (fig 8.18), utilizando el método de Kawasumi y Shima (1965), obteniéndose valores de 2.0 % y 4.5 % para las direcciones longitudinal y transversal del edificio respectivamente en el primer modo.

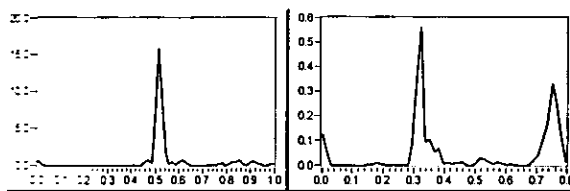


Figura 8.18 Espectros de potencia en dirección longitudinal y transversal para el cálculo del amortiguamiento.

8.2.3. Sismo del 30 de septiembre de 1999.

El día 30 de septiembre de 1999 ocurrió el sismo de mayor intensidad que se ha podido registrar el sistema de monitoreo del edificio de la CONASUPO. El evento, originado en la costa de Oaxaca, tuvo una magnitud de 7.4 grados en la escala de Richter (Mw). Fue un temblor

característico de la zona de subducción entre la placa de Cocos y la placa de Norteamérica que ocasionó graves daños en los estados de Oaxaca y Puebla, sintiéndose fuertemente en la ciudad de México. Al igual que para los sismos anteriores, no hubo daño en el edificio y los disipadores no presentaron evidencia de haber tenido desplazamiento relativo.

De la tabla 8.8, se observa que los valores de aceleración experimentados por el edificio fueron ligeramente superiores a los registrados durante el sismo del 15 de junio de 1999, sin embargo, es importante mencionar que ambos sismos fueron de características diferentes, uno de ellos atípico, ocurrido en los límites entre Puebla y Oaxaca (15 de junio) y el otro de ellos proveniente de la familia de sismos originados por el fenómeno de subducción entre la placa de Cocos y la de Norteamérica.

El procedimiento utilizado para encontrar las frecuencias correspondientes a la estructura, en las dos direcciones principales del edificio, es el utilizado anteriormente. Los espectros de Fourier, espectros cruzados y funciones de transferencia se muestran en la fig 8.19, y los resultados se resumen en la tabla 8.14.

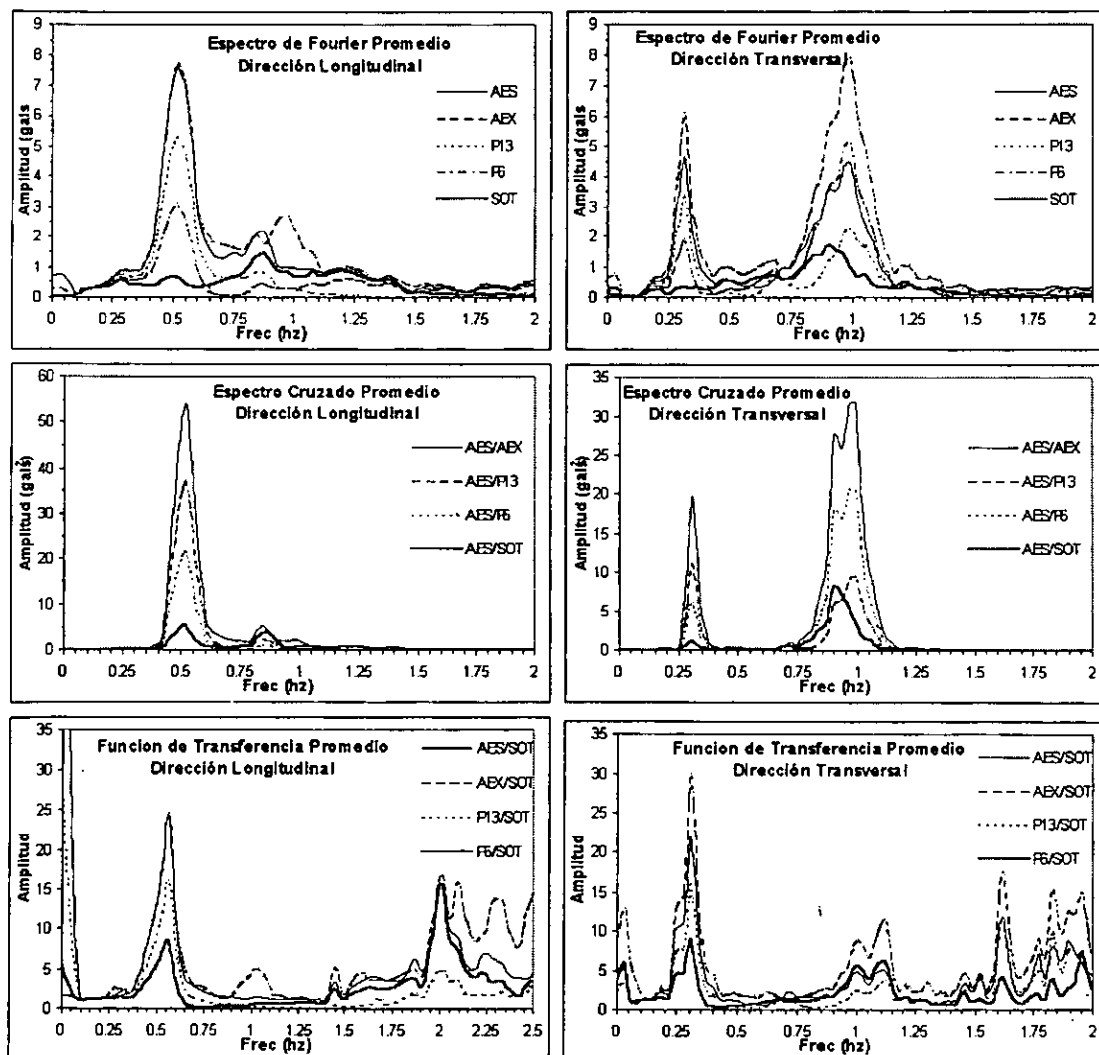


Fig 8.19. Espectros de Fourier, cruzado y de transferencia, para el cálculo de frecuencias.

Observando los espectros de Fourier o los espectros cruzados se pueden obtener 2 frecuencias principales en dirección longitudinal: 0.513 Hz (1.95 s) y 0.839-0.885 Hz (1.13-1.19 s). En dirección transversal las frecuencias que se identifican son: 0.311 Hz (3.22s) y 0.901-0.994 Hz (1.11-1.11 s). Para estos espectros, la segunda frecuencia identificada en dirección transversal, es la que presenta mayores amplitudes y por tanto una mayor concentración de energía. Adicionalmente se pudo observar que para el equipo del sótano, las frecuencias fundamentales no pueden ser fácilmente apreciadas debido a su baja amplitud

Tabla 8.14. Frecuencias obtenidas para el sismo del 30 de septiembre de 1999.

Direccion	Con espectros de Fourier(Hz)					Con espectros cruzados(Hz)				Con funciones de transferencia(Hz)			
	Aes	aex	P13	P6	Sot	Aes-aex	Aes-p13	Aes-p6	Aes-sot	Aes/Sot	Aex/Sot	P13/sot	P6/sot
Long.	0.513	0.513	0.513	0.513	0.513	0.513	0.513	0.513	0.513	0.559	0.559	0.559	0.559
Long.	0.885	0.839	0.839	0.885	0.885	0.839	0.839	0.885	0.839	-	-	-	-
Long.	-	0.978	-	-	-	-	-	-	-	-	1.03	-	-
Long.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.003	2.003	2.003	2.003
Trans.	0.311	0.311	0.311	0.311	-	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311
Trans.	0.994	0.994	0.994	0.994	0.901	0.963	0.994	0.963	0.901	1.118	1.118	1.118	1.118
Trans.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.615	1.615	1.615	1.615

Del mismo modo que en los sismos anteriores, la segunda frecuencia identificada en dirección longitudinal (0.839-0.885 Hz) tiene poca importancia en los espectros de Fourier, y esto es más evidente al observar los espectros cruzados. Además, en las funciones de transferencia no fue posible detectar esta frecuencia, en cambio se puede observar una frecuencia adicional muy bien definida, de 2.003 Hz (0.50 s). El resto de las frecuencias localizadas en los espectros de Fourier y espectros cruzados, si fue posible identificarlas en las funciones de transferencia, lo que verifica que corresponden a frecuencias de vibrar del edificio.

Para el cálculo de las formas modales y con el fin de identificar correctamente las frecuencias que corresponden al edificio, se utilizaron las funciones de transferencia respecto al equipo de la azotea, normalizando los valores de amplitud respecto a este. En el anexo 2 se presentan las funciones de transferencia, los espectros de fase y de coherencia de los 5 equipos en sus dos direcciones ortogonales.

En la tabla 8.15 se presentan los valores de la función de transferencia, fase y coherencia para las frecuencias identificadas. En dirección longitudinal se obtiene valores para las 3 frecuencias identificadas. 0.51 Hz (1.95 s), 0.84 Hz (1.1 s) y 2.00 Hz (0.50 s), mientras que para dirección transversal las frecuencias que se analizan son: 0.31 Hz (3.22 s) y 0.99 Hz (1.01 s).

Con base en los espectros presentados en el anexo 2, se puede observar que para las frecuencias identificadas, los valores de coherencias son en general altos, excepto cuando se relacionan los equipos de la azotea y el sótano en el primer modo. Sin embargo, los valores de fase y transferencia se consideran adecuados para obtener las formas modales en las dos direcciones principales. fig 8.20 y 8.21.

Tabla 8.15. Valores para el cálculo de los 2 primeros modos del sismo del 30 de septiembre de 1999.

Espectro	Frec(Hz)	aes/P13	aes/P6	aes/sot	(Transfer) ⁻¹ por nivel			
					22	13	6	0
Transfer.	0.51	1.43	2.49	15.12	1.00	0.70	0.40	0.07
Fase		-2.24	-7.32	-48.36				
Coherencia		1.00	0.97	0.30				
Transfer.	0.84	2.43	7.86	1.65	1.00	0.41	-0.13	-0.61
Fase		-1.85	-177.52	-175.22				
Coherencia		1.00	0.98	0.99				
Transfer.	2.00	3.27	1.00	15.91	1.00	-0.31	-1.00	-0.06
Fase		165.37	163.90	-170.45				
Coherencia		0.92	0.90	0.16				
Transfer.	0.31	1.39	2.40	22.21	1.00	0.72	0.42	0.05
Fase		-1.35	-4.10	-93.70				
Coherencia		1.00	0.98	0.01				
Transfer.	0.99	2.34	0.92	4.84	1.00	-0.43	-1.09	-0.21
Fase		-172.90	179.84	139.08				
Coherencia		0.95	1.00	0.38				

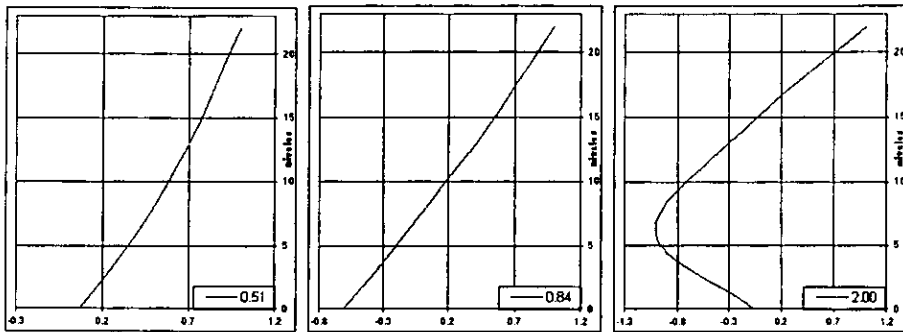


Fig 8.20. formas modales identificadas para las frecuencias en dirección longitudinal.

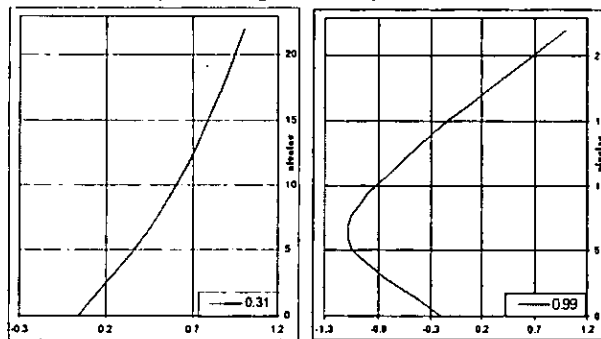


Fig 8.21. formas modales identificadas para las frecuencias en dirección transversal.

En las figuras se puede ver que la frecuencia de 0.84 Hz (1.1 s) no corresponde una segunda forma modal como se esperaría, por lo que, es posible que esta frecuencia corresponda al periodo del suelo y que la forma modal trazada sólo represente la amplificación de esta frecuencia a través de la estructura.

El cálculo del amortiguamiento que experimentó el edificio bajo esta excitación, se realizó en función de los espectros de potencia de las señales sísmicas registradas para el evento (fig 8.22), utilizando el método de Kawasumi y Shima (1965), obteniéndose valores de 1.5 % y 2.0 % para las direcciones longitudinal y transversal del edificio respectivamente en el primer modo.

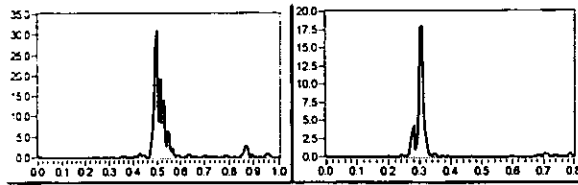


Figura 8.22 Espectros de potencia en dirección longitudinal y transversal para el cálculo del amortiguamiento.

8.2.4. Sismo del 28 de diciembre de 1999.

El 28 de diciembre de 1999 ocurrió un evento sísmico originado en las costas de Oaxaca, con una magnitud de 5.9 en la escala de Richter (Mw). Causando pequeños daños y casi fue imperceptible para la mayoría de la población en la Cd. de México. El evento fue registrado en el edificio de la ex CONASUPO.

Al igual que para los sismos anteriores, no hubo daño en el edificio y los disipadores no presentaron evidencia de haber tenido desplazamiento relativo.

El procedimiento utilizado para encontrar las frecuencias correspondientes a la estructura, en las dos direcciones principales del edificio, es el utilizado anteriormente. Los espectros de Fourier, espectros cruzados y funciones de transferencia se muestran en la fig 8.23, y los resultados se resumen en la tabla 8.16.

Tabla 8.16. Frecuencias obtenidas para el sismo del 28 de diciembre de 1999.

Dirección	Con espectros de Fourier(Hz)					Con espectros cruzados(Hz)				Con funciones de transferencia(Hz)			
	Aes	Aex	P13	P6	Sot	Aes-aex	Aes-p13	Aes-p6	Aes-sot	Aes/sot	Aex/Sot	P13/sot	P6/sot
Long.	0.560	0.560	0.560	0.560	0.600	0.560	0.560	0.560	0.600	0.520	0.520	0.520	0.520
Long.	0.839	0.839	0.839	-	0.839	0.839	0.839	-	0.839	-	-	-	-
Long.	0.919	0.959	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Long.	1.799	1.799	-	1.799	-	-	-	-	-	2.078	2.078	2.078	2.078
Trans.	0.320	0.320	0.320	0.320	-	0.320	0.320	0.320	-	0.360	0.360	0.360	0.360
Trans.	1.079	1.079	1.079	1.079	1.079	1.079	1.079	1.079	1.079	1.119	1.119	1.119	1.119

Observando los espectros de Fourier o los espectros cruzados se pueden obtener 2 frecuencias principales en dirección longitudinal: 0.560-0.60 Hz (1.67-1.79 s) y 0.839 Hz (1.19 s). En dirección transversal las frecuencias que se identifican son: 0.32 Hz (3.13s) y 1.079 Hz (0.93 s). Para estos espectros, la segunda frecuencia identificada en dirección transversal es la que presenta mayores amplitudes y por tanto una mayor concentración de energía. Adicionalmente se pudo observar que para el equipo del sótano, las frecuencias fundamentales no pueden ser fácilmente apreciadas debido a su baja amplitud

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

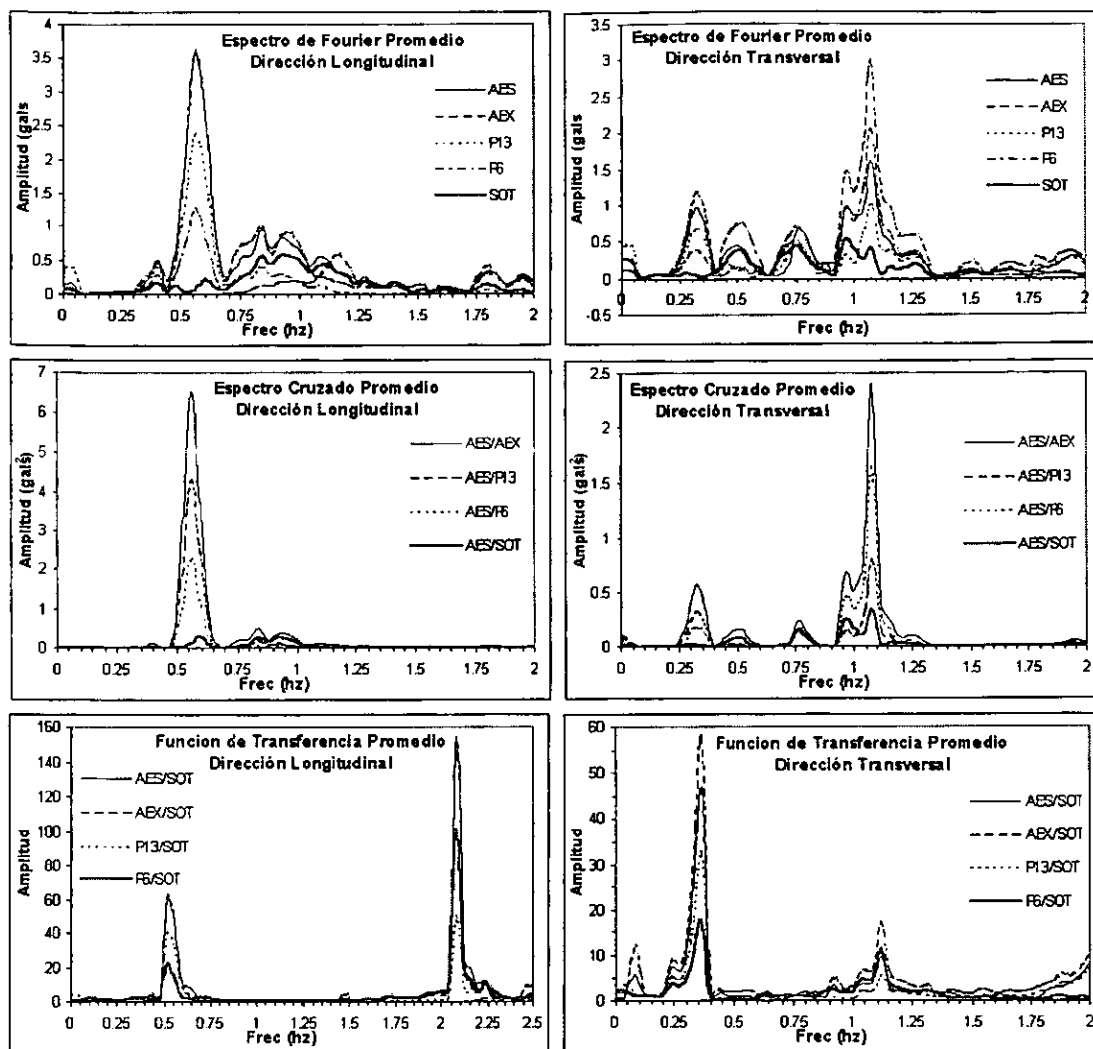


Fig 8.23. Espectros de Fourier, cruzado y de transferencia, para el cálculo de frecuencias.

Del mismo modo que en los sismos anteriores, la segunda frecuencia identificada en dirección longitudinal (0.839 Hz) tiene poca importancia en los espectros de Fourier, y esto es más evidente al observar los espectros cruzados. Además, en las funciones de transferencia no fue posible detectar esta frecuencia, en cambio se puede observar una frecuencia adicional muy bien definida, de 2.078 Hz (0.48 s). El resto de las frecuencias localizadas en los espectros de Fourier y espectros cruzados, si fue posible identificarlas en las funciones de transferencia, lo que verifica que corresponden a frecuencias de vibrar del edificio.

Para el cálculo de las formas modales y con el fin de identificar correctamente las frecuencias que corresponden al edificio, se utilizaron las funciones de transferencia respecto al equipo de la azotea, normalizando los valores de amplitud respecto a este. En el anexo 2 se presentan las funciones de transferencia, los espectros de fase y de coherencia de los 5 equipos en sus dos direcciones ortogonales.

En la tabla 8.17 se presentan los valores de la función de transferencia, fase y coherencia para las frecuencias identificadas. En dirección longitudinal se obtiene valores para las 3 frecuencias

identificadas. 0.560-0.60 Hz (1.67-1.79 s), 0.839 Hz (1.19 s) y 2.078 Hz (0.48 s), mientras que para dirección transversal las frecuencias que se analizan son: 0.32 Hz (3.13s) y 1.079 Hz (0.93 s).

Tabla 8.17. Valores para el cálculo de los 2 primeros modos del sismo del 28 de diciembre de 1999.

Espectro	Frec(Hz)	aes/P13	aes/P6	aes/sot	(Transfer) ⁻¹ por nivel			
					22	13	6	0
Transfer.	0.56	1.50	2.84	45.76	1.00	0.67	0.35	-0.02
Fase		-2.78	-3.97	-109.04				
Coherencia		1.00	1.00	0.11				
Transfer.	0.84	2.37	7.38	1.70	1.00	0.42	-0.14	-0.59
Fase		-6.49	-164.83	-178.27				
Coherencia		0.99	0.93	1.00				
Transfer.	2.08	3.12	1.51	153.61	1.00	-0.32	-0.66	-0.01
Fase		-157.23	175.25	-159.26				
Coherencia		0.85	0.99	0.87				
Transfer.	0.32	1.41	2.50	18.04	1.00	0.71	0.40	0.06
Fase		-0.15	0.26	73.50				
Coherencia		1.00	0.99	0.08				
Transfer.	1.08	1.63	0.78	3.87	1.00	-0.61	-1.28	-0.26
Fase		179.99	175.59	141.32				
Coherencia		1.00	0.99	0.61				

Con base en los espectros presentados en el anexo 2, se puede observar que para las frecuencias identificadas, los valores de coherencias son en general altos, excepto cuando se relacionan los equipos de la azotea y el sótano en el primer modo. Sin embargo, los valores de fase y transferencia se consideran adecuados para obtener las formas modales en las dos direcciones principales. fig 8.24 y 8.25.

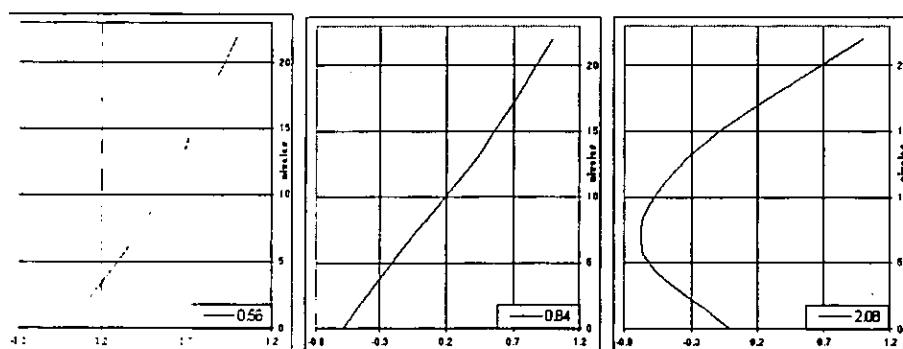


Fig 8.24. Formas modales identificadas para las frecuencias en dirección longitudinal.

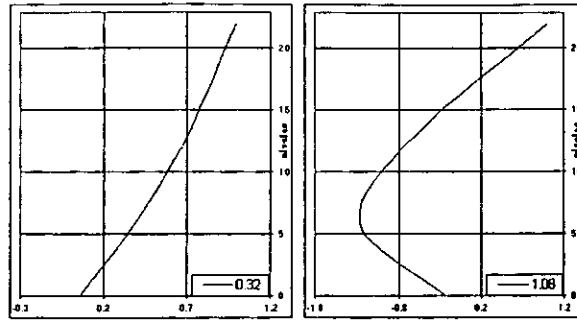


Fig 8.25. Formas modales identificadas para las frecuencias en dirección transversal.

En las figuras anteriores se puede ver que la frecuencia de 0.84 Hz (1.1 s) no corresponde a una segunda forma modal como se esperaría, por lo que, es posible que esta frecuencia corresponda al periodo del suelo y que la forma modal trazada sólo represente la amplificación de esta frecuencia a través de la estructura.

El cálculo del amortiguamiento que experimentó el edificio bajo esta excitación, se realizó en función de los espectros de potencia de las señales sísmicas registradas para el evento (fig 8.26), utilizando el método de Kawasumi y Shima (1965), obteniéndose valores de 3.4 % y 6.4 % para las direcciones longitudinal y transversal del edificio respectivamente en el primer modo.

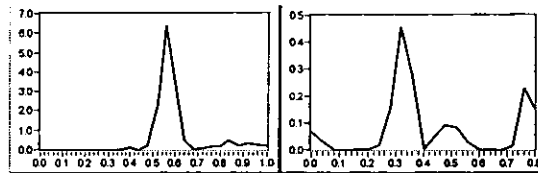


Figura 8.26 Espectros de potencia en dirección longitudinal y transversal para el cálculo del amortiguamiento.

8.2.5. Sismo del 21 de julio del 2000.

El 21 de Julio del 2000 se registró un evento sísmico originado entre los estados de Puebla y Morelos a una profundidad de 47 Km. La magnitud del sismo fue de 5.9 grados en la escala de Richter (Mw). Al igual que para los sismos anteriores, no hubo daño en el edificio y los disipadores no presentaron evidencia de haber tenido desplazamiento relativo.

El procedimiento utilizado para encontrar las frecuencias correspondientes a la estructura, en las dos direcciones principales del edificio, es el utilizado anteriormente. Los espectros de Fourier, espectros cruzados y funciones de transferencia se muestran en la fig 8.27, y los resultados se resumen en la tabla 8.18.

En los espectros de Fourier y los espectros cruzados se pueden observar 2 picos importantes en dirección longitudinal, en la frecuencias: 0.517-0.564 Hz (1.77-1.93 s) y 0.941 Hz (1.06 s). En dirección transversal las frecuencias que se identifican son: 0.306 Hz (3.27s) y 1.011 Hz (0.99 s). Para estos espectros, la segunda frecuencia identificada en dirección transversal es la que presenta mayores amplitudes y por tanto una mayor concentración de energía. Adicionalmente se

pudo observar que para el equipo del sótano, las frecuencias fundamentales no pueden ser fácilmente apreciadas.

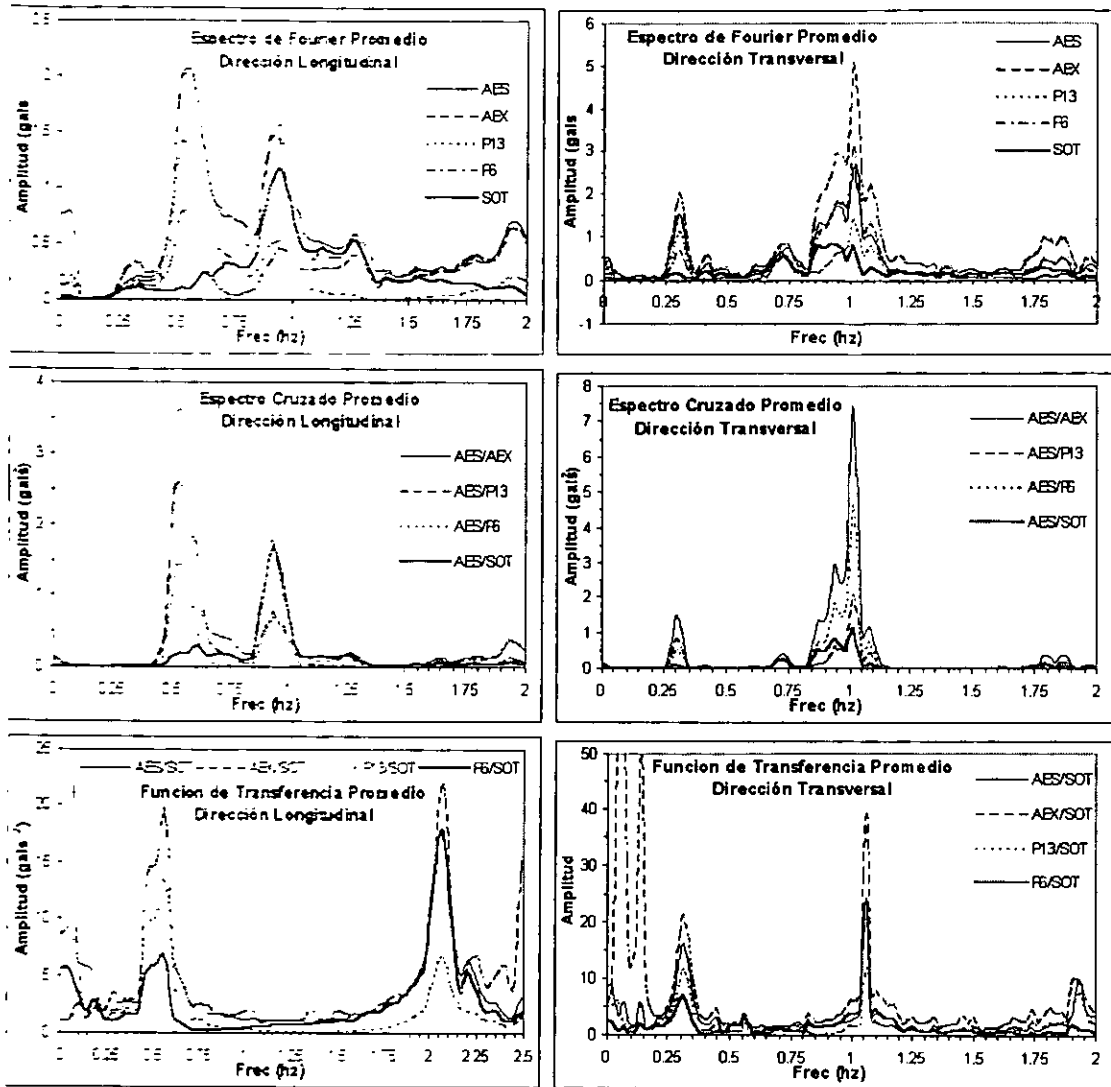


Fig 8.27. Espectros de Fourier, cruzado y de transferencia, para el cálculo de frecuencias.

Tabla 8.18 Frecuencias obtenidas para el sismo del 21 de julio del 2000.

Direccion	Con espectros de Fourier(Hz)					Con espectros cruzados(Hz)				Con funciones de transferencia(Hz)			
	Aes	aex	P13	P6	Sot	Aes-aex	Aes-p13	Aes-p6	Aes-sot	Aes/sot	Aex/sot	P13/Sot	P6/sot
Long.	0.564	0.564	0.517	0.517	-	0.517	0.517	0.517	0.564	0.564	0.564	0.564	0.564
Long.	0.941	0.894	0.941	0.941	0.941	0.941	0.941	0.941	0.941	-	-	-	-
Long.	1.928	1.928	-	-	-	-	-	-	-	2.069	2.069	2.069	2.069
Trans.	0.306	0.306	0.306	0.306	-	0.306	0.306	0.306	0.306	0.306	0.306	0.306	0.306
Trans.	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.058	1.058	1.058	1.058

Del mismo modo que en los sismos anteriores, la segunda frecuencia identificada en dirección longitudinal (0.941 Hz) tiene poca importancia en los espectros de Fourier, y esto es más

evidente al observar los espectros cruzados. Además, en las funciones de transferencia no fue posible detectar esta frecuencia, en cambio se puede observar una frecuencia adicional muy bien definida, de 2.069 Hz (0.48 s).

Para el cálculo de las formas modales y con el fin de identificar correctamente las frecuencias que corresponden al edificio, se utilizaron las funciones de transferencia respecto al equipo de la azotea, normalizando los valores de amplitud respecto a este. En el anexo 2 se presentan las funciones de transferencia, los espectros de fase y de coherencia de los 5 equipos en sus dos direcciones ortogonales, estos valores se resumen en la tabla 8.19.

Tabla 8.19. Valores para el cálculo de los 2 primeros modos del sismo del 21 de julio del 2000.

Espectro	Frec(Hz)	aes/P13	Aes/P6	aes/sot	(Transfer) ⁻¹ por nivel			
					22	13	6	0
Transfer.	0.52	1.42	2.00	14.87	1.00	0.70	0.50	0.07
Fase		-4.86	-4.67	-55.12				
Coherencia		0.99	0.99	0.28				
Transfer.	0.94	2.92	3.94	1.36	1.00	0.34	-0.25	-0.74
Fase		-10.79	-175.86	174.69				
Coherencia		0.96	0.99	0.99				
Transfer.	2.07	2.72	1.00	17.56	1.00	-0.37	-1.00	0.06
Fase		173.05	173.09	32.32				
Coherencia		0.97	0.98	0.64				
Transfer.	0.31	1.40	2.31	15.86	1.00	0.71	0.43	0.06
Fase		-4.16	-6.10	-49.47				
Coherencia		0.99	0.99	0.36				
Transfer.	1.01	1.84	0.84	3.15	1.00	-0.54	-1.19	-0.32
Fase		-178.87	179.25	131.25				
Coherencia		0.99	1.00	0.42				

En dirección longitudinal se obtiene valores para las 3 frecuencias identificadas, 0.52 Hz (1.93 s), 0.94 Hz (1.06 s) y 2.07 Hz (0.48 s), mientras que para dirección transversal las frecuencias que se analizan son: 0.31 Hz (3.27 s) y 1.01 Hz (0.99 s).

Con base en los valores presentados, se puede observar que para las frecuencias identificadas, los valores de coherencias son en general altos, excepto cuando se relacionan los equipos de la azotea y el sótano en el primer modo. Sin embargo, los valores de fase y transferencia se consideran adecuados para obtener las formas modales en las dos direcciones principales, fig 8.28 y 8.29.

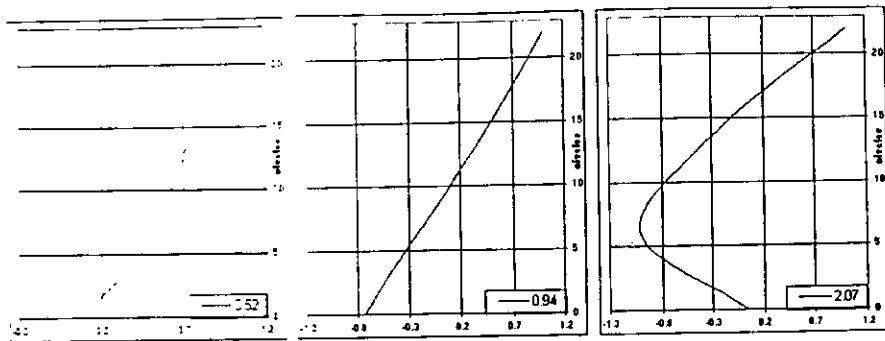


Fig 8.28. formas modales identificadas para las frecuencias en dirección longitudinal.

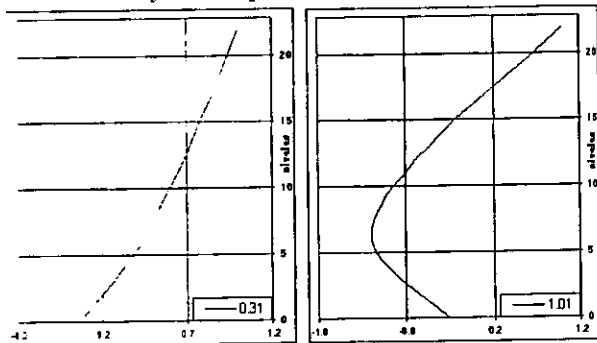


Fig 8.29. formas modales identificadas para las frecuencias en dirección transversal.

En las figuras anteriores se puede ver que la frecuencia de 0.94 Hz (1.06 s) no corresponde a una segunda forma modal como se esperaba, por lo que, es posible que esta frecuencia corresponda al periodo del suelo y que la forma modal trazada sólo represente la amplificación de esta frecuencia a través de la estructura.

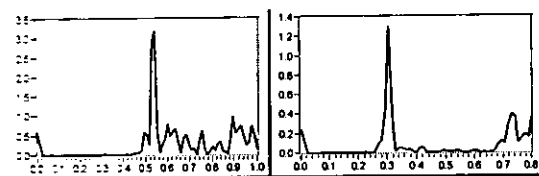


Figura 8.30. Espectros de potencia en dirección longitudinal y transversal para el cálculo del amortiguamiento.

El cálculo del amortiguamiento que experimentó el edificio bajo esta excitación, se realizó en función de los espectros de potencia de las señales registradas (fig 8.30), utilizando el método de Kawasumi y Shima (1965), obteniéndose valores de 2.1 % y 2.9 % para las direcciones longitudinal y transversal del edificio respectivamente en el primer modo.

8.2.6. Sismo del 9 de agosto del 2000.

El último sismo analizado en este trabajo, es el que ocurrió el 9 de agosto del 2000, este evento tuvo origen frente a las costas de Guerrero y Michoacán con una profundidad de 9 km y una magnitud de 6.4 grados en la escala de Richter (Mw), sintiéndose fuertemente en Michoacán y la ciudad de México.

Al igual que para los sismos anteriores, no hubo daño en el edificio y los disipadores no presentaron evidencia de haber tenido desplazamiento relativo.

El procedimiento utilizado para encontrar las frecuencias correspondientes a la estructura, en las dos direcciones principales del edificio, es el utilizado anteriormente. Los espectros de Fourier, espectros cruzados y funciones de transferencia se muestran en la fig 8.31, y los resultados se resumen en la tabla 8.20.

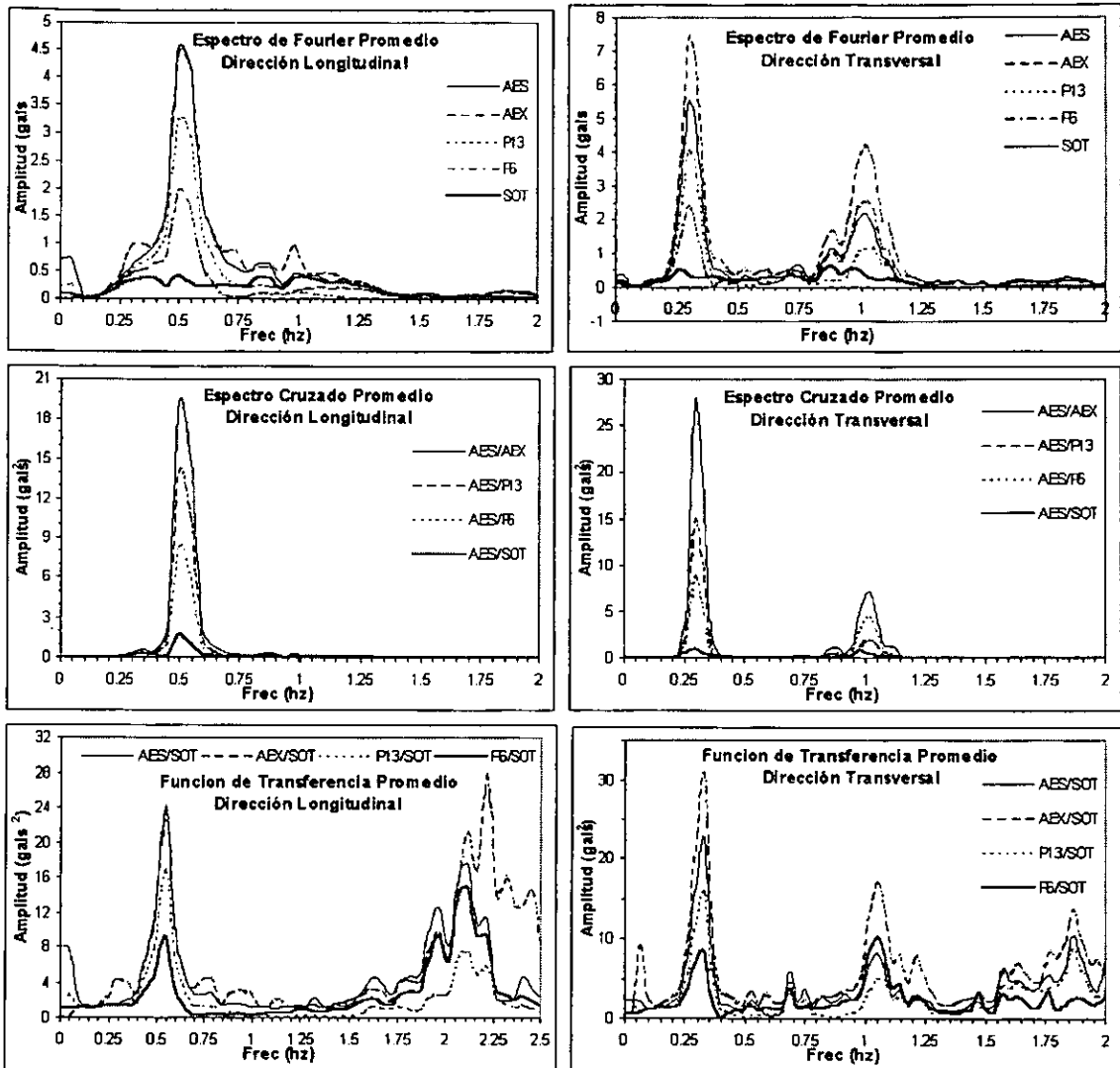


Fig 8.31. Espectros de Fourier, cruzado y de transferencia, para el cálculo de frecuencias.

En los espectros de Fourier y los espectros cruzados se pueden observar un pico importante en dirección longitudinal, en la frecuencias de 0.491 Hz (2.04 s). En dirección transversal las frecuencias que se identifican son: 0.262-0.295 Hz (3.39-3.82 s) y 1.016-1.048 Hz (0.95-0.98 s). Para estos espectros, la segunda frecuencia identificada en dirección transversal es la que presenta mayores amplitudes y por tanto una mayor concentración de energía. Adicionalmente se pudo observar que para el equipo del sótano, las frecuencias fundamentales no pueden ser fácilmente apreciadas.

Tabla 8.20. Frecuencias obtenidas para el sismo del 9 de agosto del 2000.

Dirección	Con espectros de Fourier(Hz)					Con espectros cruzados(Hz)				Con funciones de transferencia(Hz)			
	Aes	ax	P13	P6	Sot	Aes- aes	Aes- p13	Aes- p6	Aes- sot	Aes/ sot	Aex/ sot	P13/ Sot	P6/ sot
Long.	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.540	0.540	0.540	0.540
Long.	-	0.982	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Long.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.113	2.113	2.113	2.113
Trans.	0.295	0.295	0.295	0.295	0.262	0.295	0.295	0.295	0.295	0.328	0.328	0.328	0.328
Trans.	1.016	1.016	1.048	1.016	-	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016	1.048	1.048	1.048

Para este sismo, una segunda frecuencia en dirección longitudinal (0.982 Hz), únicamente fue identificada en un espectro de Fourier. Además, en las funciones de transferencia no fue posible detectar esta frecuencia, en cambio se puede observar una frecuencia adicional muy bien definida, de 2.113 Hz (0.47 s).

Para el cálculo de las formas modales y con el fin de identificar correctamente las frecuencias que corresponden al edificio, se utilizaron las funciones de transferencia respecto al equipo de la azotea, normalizando los valores de amplitud respecto a este. En el anexo 2 se presentan las funciones de transferencia, los espectros de fase y de coherencia de los 5 equipos en sus dos direcciones ortogonales, estos valores se resumen en la tabla 8.21.

Tabla 8.21. Valores para el cálculo de los 2 primeros modos del sismo del 9 de agosto del 2000.

Espectro	Frec(Hz)	aes/P13	aes/P6	aes/sot	(Transfer) ⁻¹ por nivel			
					22	13	6	0
Transfer.	0.49	1.39	2.30	11.11	1.00	0.72	0.43	0.09
Fase		-6.75	-7.45	-33.42				
Coherencia		0.99	0.98	0.63				
Transfer.	2.11	2.28	1.27	17.47	1.00	-0.44	-0.79	0.06
Fase		155.19	167.24	93.02				
Coherencia		0.77	0.93	0.01				
Transfer.	0.30	1.36	2.25	17.27	1.00	0.74	0.44	0.06
Fase		-4.07	-3.03	-31.76				
Coherencia		0.99	0.99	0.42				
Transfer.	1.02	1.92	0.83	6.82	1.00	-0.52	-1.20	-0.15
Fase		168.23	170.60	132.25				
Coherencia		0.94	0.97	0.37				

En dirección longitudinal se obtiene valores para las 2 frecuencias identificadas, 0.49 Hz (2.04 s) y 2.11 Hz (0.47 s), mientras que para dirección transversal las frecuencias que se analizan son: 0.30 Hz (3.39 s) y 1.02 Hz (0.98 s).

Con base en los valores presentados, se puede observar que para las frecuencias identificadas, los valores de coherencias son en general altos, excepto cuando se relacionan los equipos de la azotea y el sótano en el primer modo. Sin embargo, los valores de fase y transferencia se consideran adecuados para obtener las formas modales en las dos direcciones principales, fig 8.32 y 8.33.

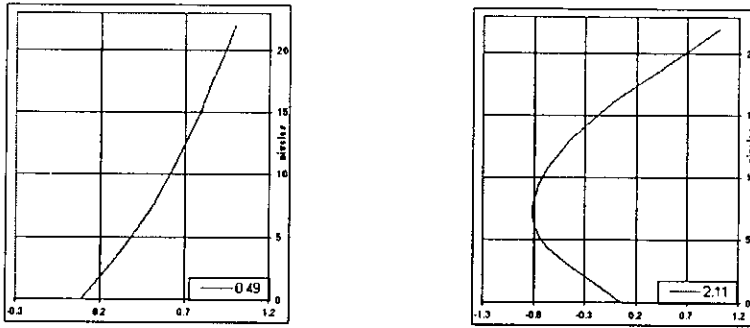


Fig 8.32. formas modales identificadas para las frecuencias en dirección longitudinal.

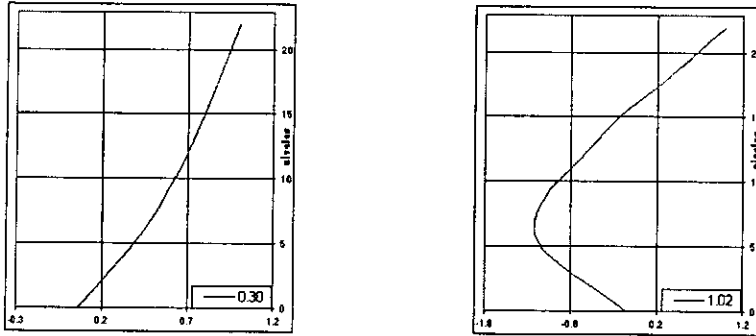


Fig 8.33. formas modales identificadas para las frecuencias en dirección transversal.

El cálculo del amortiguamiento que experimentó el edificio bajo esta excitación, se realizó en función de los espectros de potencia de las señales sísmicas registradas para el evento (fig 8.34), utilizando el método de Kawasumi y Shima (1965), obteniéndose valores de 2.0 % y 1.2 % para las direcciones longitudinal y transversal del edificio respectivamente en el primer modo.

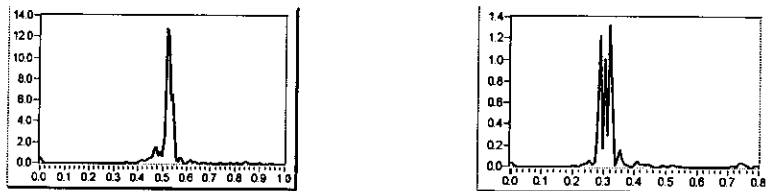


Figura 8.34. Espectros de potencia en dirección longitudinal y transversal para el cálculo del amortiguamiento.

9. ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS.

9.1. Resultados analíticos.

Para la obtención de frecuencias y periodos del edificio se utilizó el programa ETABS versión 6.1. En la fig. 9.1 se presentan los modelos estructurales, que fueron analizados para estudiar el comportamiento de la estructura original y reforzada.

Es importante mencionar que de las inspecciones realizadas a la estructura reforzada, no se encontró evidencia de que los disipadores de energía hayan rebasado el rango de comportamiento lineal después de los sismos registrados en el edificio. Debido a ello, es válido suponer que la estructura se ha comportado elásticamente y que la rigidez lateral del refuerzo ha sido proporcionada básicamente por el trabajo conjunto del sistema diagonal-disipador, trabajando como puntal. Este hecho lo corroboran los bajos valores de amortiguamiento experimentados por el edificio, presentados en el capítulo anterior.

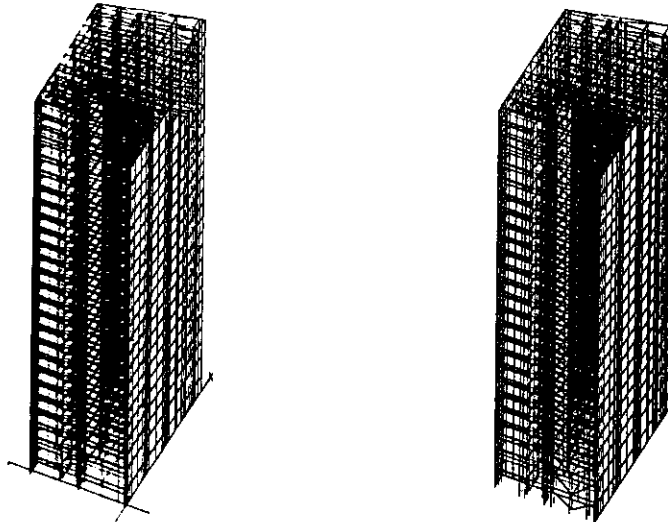


Figura 9.1. Modelos estructurales del edificio de la ex -CONASUPO, antes y después del reforzamiento.

Para la estimación de las cargas actuantes en el edificio, se le consideró como una estructura tipo B, para uso de oficinas. En el cálculo numérico de los periodos y formas modales se consideró que la estructura estaba perfectamente empotrada en su base.

Tabla 9.1. Periodos y frecuencias teóricos del edificio.

MODO	Sin reforzar		Reforzada	
	PERIODO(s.)	FRECUENCIA(Hz)	PERIODO(s.)	FRECUENCIA(Hz)
1	3.65994	0.27323	2.89665	0.34523
2	1.15924	0.86263	1.15182	0.86819
3	1.10974	0.90111	0.90078	1.11015
4	0.69820	1.43226	0.65621	1.52390
5	0.61384	1.62908	0.57919	1.72655
6	0.52824	1.89308	0.48845	2.04730
7	0.43146	2.31774	0.39169	2.55305

Con base en los resultados obtenidos de los modelos analíticos, en la tabla 9.1, se presentan las primeras frecuencias y periodos de vibrar del edificio para las dos configuraciones estructurales (antes y después del reforzamiento).

En general las frecuencias obtenidas analíticamente son mayores (y por lo tanto los periodos son menores) que las que se obtuvieron experimentalmente. Esto se debe a que el modelo analítico no considera los efectos interacción suelo-estructura, lo que provoca que se obtengan periodos como si el edificio estuviera cimentado en roca.

Del análisis matemático se obtuvieron las formas modales para los 18 primeros modos de vibrar. Sin embargo, las formas modales presentan valores de desplazamiento significativos únicamente para una dirección en cada modo, lo cual se puede atribuir a la variación de rigidez en cada dirección del edificio.

Los formas modales rotacionales presentaron valores muy pequeños de desplazamientos, por lo menos hasta el 18° modo (9 Hz), lo que confirma que los modos torsionales ocurren a altas frecuencias y carezcan de importancia estructural. En las figs 9.2 a 9.4 se presentan los dos primeros modos en las direcciones principales (longitudinal y transversal) del edificio.

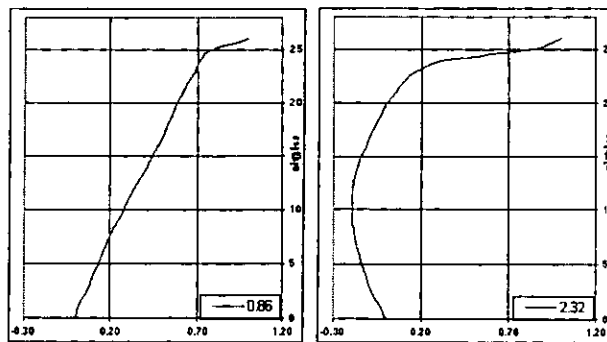


Figura 9.2. Primeros dos modos en dirección longitudinal obtenidos analíticamente antes del reforzo.

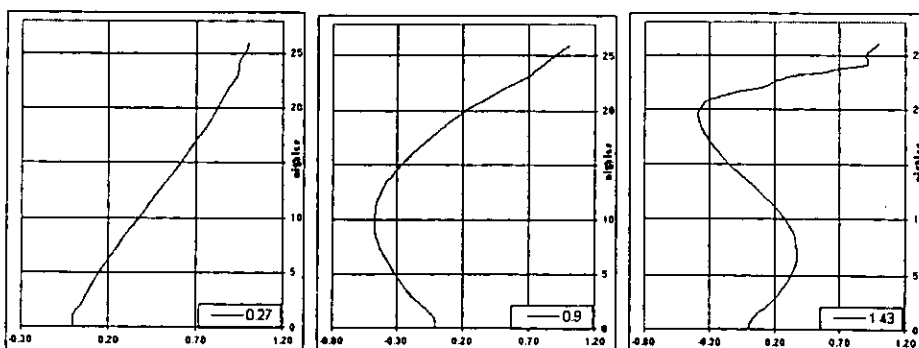


Figura 9.3. Primeros tres modos en dirección transversal obtenidos analíticamente antes del reforzo.

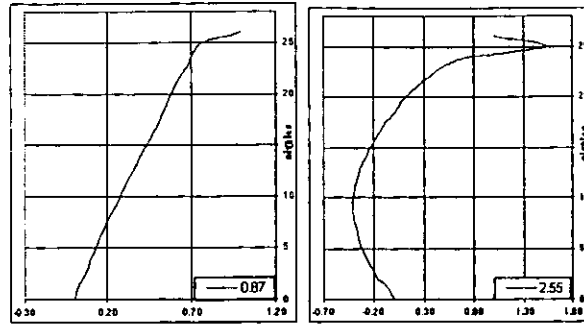


Figura 9.4. Primeros dos modos en dirección longitudinal obtenidos analíticamente después del refuerzo.

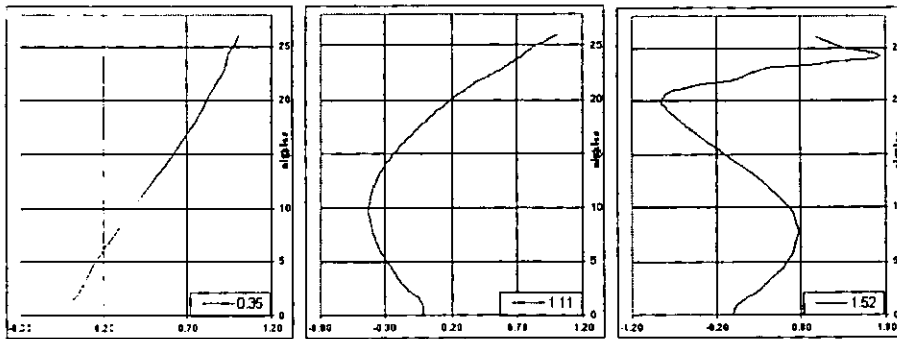


Figura 9.5. Primeros tres modos en dirección transversal obtenidos analíticamente después del refuerzo.

Las segundas formas modales de la estructura antes y después del refuerzo en dirección longitudinal corresponden a valores cercanos a 2.0 Hz, con lo que podemos decir que la segunda frecuencia que se encontró a través de las funciones de transferencia, es la que corresponde al segundo modo de la estructura.

9.2. Comparación de resultados.

En la tabla 9.2 se presentan los niveles de aceleración pico que fueron registrados en los cinco equipos de medición instalados en el edificio, producto de los seis eventos sísmicos estudiados en este trabajo. Se observa que los niveles mayores de aceleración corresponden a los sismo del 15 de junio (101 gals) y 30 de septiembre de 1999 (109 gals) en el instrumento colocado en la azotea exterior.

Tabla 9.2 Aceleraciones pico registradas en el edificio para los sismos estudiados.

Sismo	15/06/99		21/06/99		30/09/99		28/12/99		21/07/00		09/08/00	
Ubicación	Long (gal)	Transv (gal)	Long (gal)	Transv (gal)	Long (gal)	Transv (gal)	Long (gal)	Transv (gal)	Long (gal)	Transv (gal)	Long (gal)	Transv (gal)
az. exterior	-48.92	-100.59	-16.17	16.47	-76.40	-108.79	9.10	-8.98	-17.12	31.43	29.40	-31.79
az. interior	-45.03	-65.14	13.41	10.54	67.06	66.10	9.58	4.79	17.24	16.29	22.99	19.16
Piso 13	24.43	39.76	8.14	5.75	-38.32	34.01	5.75	3.8	8.62	-10.06	14.85	11.98
piso 6	17.72	64.67	5.75	-9.58	-29.70	-68.50	-3.35	5.27	9.10	18.20	9.10	-17.24
Sótano	22.51	22.87	-4.55	4.43	15.45	-22.63	2.40	2.40	-6.23	6.47	6.23	5.63

En la tabla 9.3 se resumen los valores de frecuencias y periodos obtenidos del análisis de las señales de vibración ambiental y de los 6 sismos considerados en este estudio. En esta tabla se observa que los periodos obtenidos del análisis de las señales de los eventos sísmicos oscilan entre 1.79 y 2.04 s. para la dirección longitudinal y entre 3.10 y 3.51 s. para la dirección transversal. Desafortunadamente no se registró ningún evento sísmico antes del reforzamiento del edificio, no fue posible obtener el periodo bajo este tipo de excitaciones.

Tabla 9.3 Frecuencias fundamentales para el edificio según espectros de Fourier.

EXCITACIONES	Dir Longitudinal		Dir Transversal	
	F(Hz)	T (s)	f(Hz)	T (s)
Estructura sin refuerzo				
Vibración ambiental	0.60	1.68	0.32	3.17
Analítica	0.86	1.16	0.27	3.66
Estructura con refuerzo				
Sismo del 15 de Junio de 1999	0.50	1.99	0.29	3.51
Sismo del 21 de Junio de 1999	0.53	1.89	0.32	3.10
Sismo del 30 de Septiembre de 1999	0.51	1.95	0.31	3.22
Sismo del 28 de Diciembre de 1999	0.56	1.79	0.32	3.13
Sismo del 21 de Julio del 2000	0.52	1.93	0.31	3.27
Sismo del 9 de Agosto del 2000	0.49	2.04	0.30	3.39
Promedio	0.52	1.93	0.31	3.27
Vibración ambiental	0.63	1.61	0.36	2.86
Analítica	0.87	1.15	0.35	2.90

Al comparar los valores de frecuencia obtenidos de señales de vibración ambiental y forzada, se puede observar que estas últimas se reducen, es decir, se presenta un incremento en los valores de periodos asociado a los niveles de aceleración registrado en los dos tipos de excitación. Por ejemplo, comparando los valores de los periodos en las direcciones longitudinal y transversal del edificio obtenidos de mediciones de vibración ambiental (1.61 y 2.86 s), con los correspondientes al promedio de los sismos registrados (1.93 y 3.27 s), se observan incrementos de 20.0 y 14.3 % respectivamente. De estos valores se puede observar que los incrementos en periodo no son proporcionales en las dos direcciones del edificio, lo que refleja la diversidad en los sistemas resistentes utilizados en cada dirección.

En términos generales los estudios relativos a la obtención de propiedades dinámicas de estructuras basados en el análisis de señales sísmicas, reportan incrementos en los periodos con respecto a los obtenidos del análisis de señales de tipo ambiental. Estos incrementos son variables y dependen de manera importante del nivel de excitación que sufre la estructura.

De acuerdo a estos resultados es posible observar que los periodos obtenidos experimentalmente, son mayores a los correspondientes a los modelos analíticos, lo cual es razonable, dadas las características asumidas en el modelo estructural al considerarse empotrado en su base, mientras que los resultados experimentales consideran el movimiento conjunto del suelo y la estructura.

Las diferencias entre los periodos obtenidos antes y después del refuerzo para los modelos analíticos los valores de periodo fueron casi idénticos en dirección longitudinal, mientras que en la dirección transversal se observó un decremento de 21% respecto al valor inicial.

Al comparar los resultados experimentales de vibración sísmica con los analíticos, los obtenidos experimentalmente presentan un incremento de 68 % y 13 % respecto a los resultados analíticos después del refuerzo en la dirección longitudinal y transversal respectivamente.

En las figuras 9.6 se muestran las formas modales obtenidas para los primeros y segundos modos respectivamente en todos los eventos sísmicos analizados. En estas figuras es posible observar que las formas modales coinciden en general para los dos primeros modos presentados, lo que da certidumbre en el cálculo de la misma. Además en la fig 9.7 se muestra las formas modales para la frecuencia longitudinal cercana a 0.90 Hz que se atribuye a valores de frecuencia del terreno

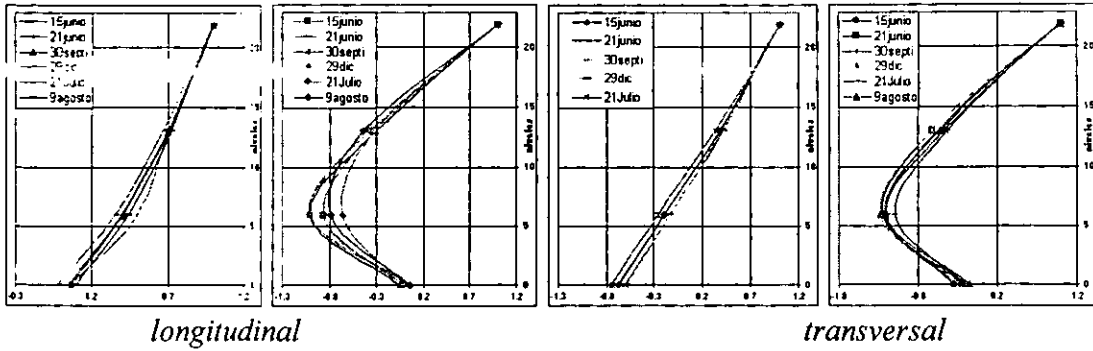


Figura 9.6. Primeros modos de los sismos analizados.

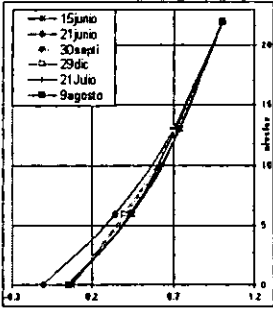


Figura 9.7. Forma modal para la frecuencia de 0.90 Hz.

Se trató de encontrar la frecuencia correspondiente al modo en torsión, calculando los espectros cruzados y las funciones de transferencia de las señales obtenidas de los 2 equipos colocados en la azotea: azotea escalera y azotea exterior. Los espectros mencionados con un valor máximo de frecuencias de 2.5 Hz se muestran en la fig 9.8.

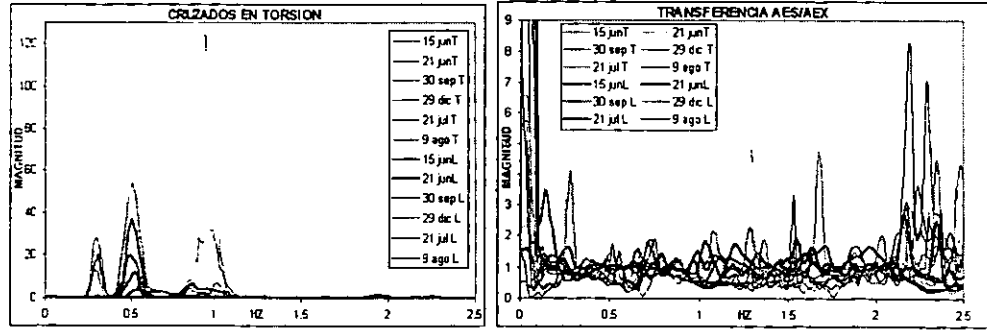


Figura 9.8. Espectros cruzados (aes)(aex) y funciones de transferencia aes/aex.

En el espectro cruzado es posible observar que las frecuencias destacadas corresponden a los valores de frecuencia obtenidos para los modos traslacionales, lo que significa que no hay ninguna señal adicional a las obtenidas previamente y que corresponden a modos en dirección longitudinal o transversal. Además, en el espectro de la función de transferencia no se distingue ninguna frecuencia que corresponda a las dos direcciones principales del edificio, y hasta para las funciones en una misma dirección no es clara ninguna frecuencia.

Debido a todo lo anterior es claro que no existe frecuencia a torsión que tenga valores pequeños de frecuencia, lo que concuerda con la suposición de que la rigidez torsional del edificio es grande.

En la tabla 9.4 se presentan los porcentajes de amortiguamiento crítico obtenidos con los espectros de potencia de las señales de vibración ambiental y de los sismos registrados

Tabla 9.4. Porcentaje de amortiguamiento crítico que experimento la estructura.

Dirección	Ambiental		Sismos					
	Antes	Después	15 junio	21 junio	30 septiembre	28 diciembre	21 julio	9 agosto
Longitudinal	2.8	3.6	1.3	2.0	1.5	3.4	2.1	2.0
Transversal	7.1	4.6	1.8	4.5	2.0	6.4	2.9	1.2

Los amortiguamientos se obtuvieron de acuerdo al método propuesto por Kawasumi y Shima (1965) utilizando el valor de 2.0 para la variable λ , de acuerdo a lo que indica Gonzalez (1989). Los valores presentados en general son inferiores al 5% empleado en la práctica, por lo que podemos decir que el edificio cumple con la suposición de poco amortiguamiento, aún con la estructuración modificada por efecto de los disipadores de energía.

En los espectros de vibración ambiental en dirección transversal, es posible encontrar que los valores de amortiguamiento son menores en la etapa antes que después del refuerzo en dirección transversal. Para ser considerados estos valores como exactos, se requiere de un análisis más refinado, sin embargo los amortiguamientos obtenidos alcanzar el objetivo de obtener valores cualitativos, y proporcionan una idea del orden de esta propiedad dinámica del edificio.

10. CONCLUSIONES

A continuación se mencionan las principales conclusiones del estudio:

- ✓ De acuerdo al análisis espectral realizado, se pudieron identificar sólo dos frecuencias dominantes en cada dirección de análisis del edificio. Particularmente, en vibración ambiental los primeros modos en dirección longitudinal y transversal son los dominantes, mientras que en el análisis de señales de origen sísmico, los espectros mostraron que la frecuencia dominante en dirección transversal fue aquella asociada al segundo modo de vibrar. Este resultado indica que el comportamiento del edificio en esta dirección, no está gobernado por el modo fundamental.
- ✓ Hasta la fecha no se ha reportado evidencia de daño físico en la estructura, ni corrimiento relativo en los disipadores de energía instalados en el edificio, por lo tanto, se asume que el comportamiento de la estructura en su conjunto, ha sido elástico. Este resultado puede ser sustentado en los bajos niveles de amortiguamiento estructural obtenidos para los 6 sismos estudiados. Desafortunadamente, bajo estas circunstancias no fue posible evaluar el comportamiento de los disipadores de energía colocados en el edificio.
- ✓ En términos generales, los resultados obtenidos en este trabajo, concuerdan con los estudios realizados sobre la determinación de las propiedades dinámicas de estructuras a partir de señales de tipo ambiental, donde se reportan incrementos en los periodos cuando se obtienen a partir de señales sísmicas. Los incrementos en periodos son variables y dependen de las características estructurales de los edificios, y de manera importante del nivel de excitación que sufre la estructura.
- ✓ Para el edificio estudiado, el incremento que sufre el periodo no es uniforme en sus dos direcciones principales, alcanzándose valores de 4.2 y 9.8 % para las direcciones longitudinal y transversal respectivamente. Con base en lo anterior, se puede concluir que para el edificio en cuestión, la dirección transversal es la más sensible al tipo de excitación que se presenta, lo cual se puede atribuir a las características del sistema estructural que proporcionan la rigidez lateral en esa dirección y a la flexibilidad de la misma.
- ✓ La comparación de los valores de periodo obtenidos analíticamente y experimentalmente, hace evidente la existencia de efectos de interacción suelo-estructura, por lo cual se considera importante incluirlo en el modelo para mejorar la calidad de los resultados analíticos.
- ✓ Del análisis espectral realizado, no fue posible identificar con claridad la frecuencia a torsión, lo que indica que la estructura tiene un alto valor de rigidez torsional. Lo que era evidente al tener dos muros de concreto en dos de sus fachadas, y se reafirmó al hacer un estudio más preciso sobre estas frecuencias.

ESTA TESIS NO PUEDE
SER REPRODUCIDA

- ✓ En la actualidad, la evolución de los equipos y programas de computo permite desarrollar sistemas como el instrumento virtual presentado en esta tesis, sin embargo, su implementación requiere profundizar en áreas de conocimiento ajenas a la formación de los ingenieros estructuristas. Por esta razón, a pesar de que el manejo del programa desarrollado es simple, el correcto uso de este tipo de herramientas hace necesario un conocimiento adecuado del análisis espectral de Fourier aplicado a la ingeniería estructural.
- ✓ Los valores de amortiguamiento son inexactos, sin embargo son cantidades cualitativamente menores a 5 %, con lo se demuestra que este edificio cumple la suposición de pequeño amortiguamiento, lo que contribuye a que sea aplicable la teoría mostrada en esta tesis.
- ✓ Los valores de amortiguamiento crítico obtenidos sólo indican esta variable deben ser refinados, con el fin de que el amortiguamiento propio de la estructura sea considerado en la disipación de la energía sísmica. Esta consideración, sin duda, puede aplicarse a otras estructuras, con lo que podríamos colocar más eficientemente los disipadores de energía.
- ✓ A pesar de que faltan determinar otras características estructurales del edificio de la Ex CONASUPO, se pretende dar bases teóricas, mostrando sus aplicaciones prácticas en estructuras reales, principalmente para la obtención de las primeras frecuencias y de los modos de vibrar de una estructura a partir de señales aleatorias.

11. RECOMENDACIONES.

Se recomienda hacer otros estudios semejantes a este, y documentar toda la información que se obtiene de estudios experimentales, y darlos a conocer al gremio, de manera que el área de análisis de señales sea divulgada para su propio enriquecimiento.

- ✓ Es común que en este tipo de estudios se omita cualquier tipo de metodología utilizada para llevar a cabo el análisis espectral de señales y sólo se presenten los resultados finales. Al respecto, en este trabajo se pretende describir con claridad el proceso completo de análisis de señales registradas en estructuras y los fundamentos matemáticos para llevarlo a cabo, basados en el análisis de Fourier, por lo cual se recomienda al lector la revisión de los mismos, previo al empleo de herramientas como la desarrollada en esta tesis.
- ✓ Sería deseable contar con información experimental de señales adquiridas con un equipo colocado fuera del edificio de modo que permita estimar la interacción suelo-estructura.
- ✓ Revalorar el diseño de los disipadores y su disposición en la estructura.
- ✓ Es necesario replantear la obtención del amortiguamiento crítico a partir de los resultados experimentales, ya que es un parámetro que influye definitivamente en
- ✓ Los valores de amortiguamiento crítico obtenidos deben ser refinados, con el fin de que el amortiguamiento propio de la estructura sea considerado en la disipación de la energía sísmica.
- ✓ Los estudios realizados al edificio y presentados en esta tesis, son sólo una parte de los que es posible efectuar en estructuras existentes. Sin embargo esta tesis pretende ser la base para realizar nuevos estudios, y alcanzar un conocimiento más amplio de las propiedades dinámicas de este y cualquier otro edificio.

REFERENCIAS

- National Instruments (1998), *LabVIEW User manual*, National Instruments Corporation, Austin Texas.
- Aguirre M. y Sánchez R. (1990), *Disipadores de energía sísmica*, Construcción y Tecnología (Rev), Vol III, No 27, pp 15-19.
- Martínez E. (1990) *Mejoramiento de la respuesta sísmica de edificios dañados, mediante la acción de disipadores de energía*, Memorias del seminario sobre instrumentación sísmica y uso de elementos disipadores de energía en el comportamiento estructural, México D. F., pp 211-248.
- Silva F. Y Ruiz S. (1994) *Comparación de la respuesta sísmica de marcos con dispositivos disipadores de energía y sin ellos*, Revista Ingeniería Sísmica, SMIS., No. 48, pp 23-40, septiembre-diciembre.
- Montiel M. A. Y Silva F. L. (1998), *Dos alternativas de refuerzo de un edificio de 27 niveles: con dispositivos disipadores de energía sísmica y con contravientos*. XI congreso nacional de Ingeniería Estructural. Volumen I.
- Muria V. D. y Gonzalez A. R. (1995) *Propiedades dinámicas de edificios en la ciudad de México*, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 51, pp 25-45.
- Ancira L.R. (1982) *Estudio sobre efectividad de absorvedores de energía en edificios*, Tesis de licenciatura en Ing. Civil, UNAM
- Jara, J.M. y Vargas E. (1991) *Dispositivos para reducir la Respuesta Sísmica de Estructuras*, Centro de Investigación Sísmica, Fundación Javier Barros Sierra.
- Alonso J. L. (1989) *Mechanical characteristic of X-plate energy dissipators*, CE 299 report, University of California at Berkeley.
- Whittaker A., Bertero, V., Alonso J. y Thompson C. (1989), *Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements*, Earthquake engineering research center, report no UCB/EERC-89/02, University of California at Berkeley.
- Skinner R. I., Kelly J. M. y Heine A. J. (1975) *Hysteretic dampers for earthquake resistant structures*, earth eng struct dyn, vol 3, pp 287-296
- Skinner R. I. y McVerry G. H. (1975) *Base isolation for increased earthquake resistance of buildings*, Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng, Vol 8, No 2, pp 297-309.
- Pall , A. S. and Marsh, C (1982) *Response of Friction Damped Braced frames*, J Struct Div, ASCE, vol 108, No ST6, pp 1313-1323.

- Bendat J. S. y Piersol A. G. (1993), *Engineering Applications of Correlations and Spectral Analysis*, 2ª Ed., John Wiley & Sons, Nueva York.
- Kawasumi H. y Shima E., (1965), *Some Applications of a Correlator Engineering Problems*, III WCEE, Vol 2, Nueva Zelandia, pp II-298 a II-320.
- Gonzalez A. R. (1989), *Cinemática del movimiento de edificios de la ciudad de México*, Tesis de Maestría, UNAM, México.
- Ayala, A.G., García O., Lermo J., Torres M. y Téllez S. (1999), *Proyecto para la puesta en marcha y operación de la instrumentación sísmica del edificio de la compañía nacional de subsistencias populares (CONASUPO)*, Informe técnico primera parte, García-BBM Mexicana, Mexico, D.F.
- Fernández L.E., Ayala A.G. y García O. (1999), *Evaluación del comportamiento mecánico de placas de acero dúctil como dispositivos de disipación de energía*, Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Vol I. Instituto de Ingeniería, Cd. Universitaria, México.
- Escobar J.A. y Sánchez A.R., (1998) *Ensayo ante Carga Estática y Dinámica de un Dispositivo Disipador de Energía*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Ayala, A. G. y García O. (1998) *Comentarios al informe "Ensayo ante Carga Estática y Dinámica de un Dispositivo Disipador de Energía"*, realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para la CONASUPO.
- Terra Technology (1999) *ALLView (AV) versión 30078*, Geo sys Switzerland

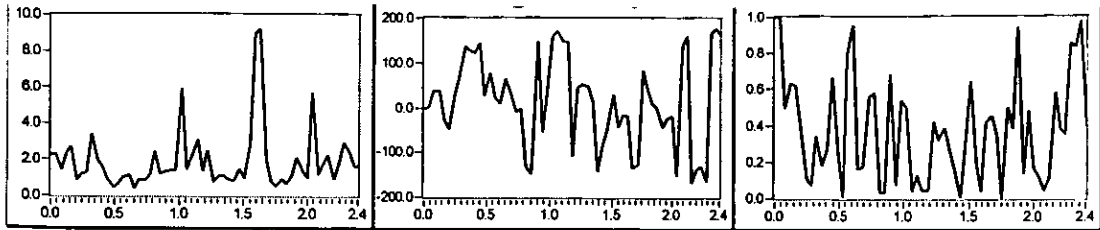
ANEXOS

ANEXO 1

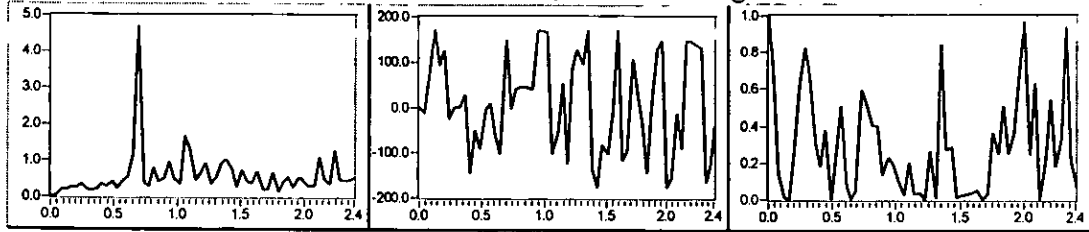
A1. ESPECTROS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA, DE FASE Y DE COHERENCIA DE SEÑALES DE TIPO AMBIENTAL.

ANTES DEL REFUERZO

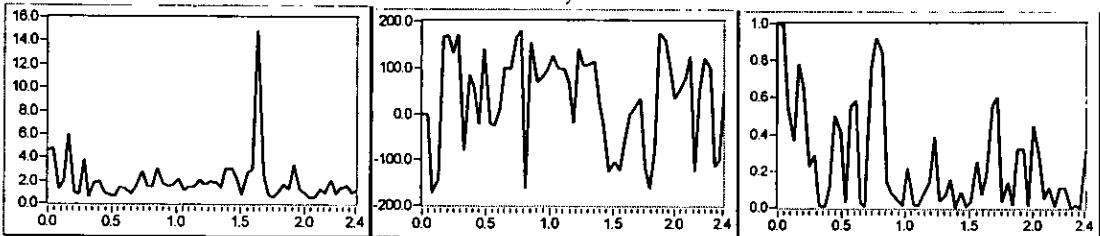
Señal del 22 de junio de 1998



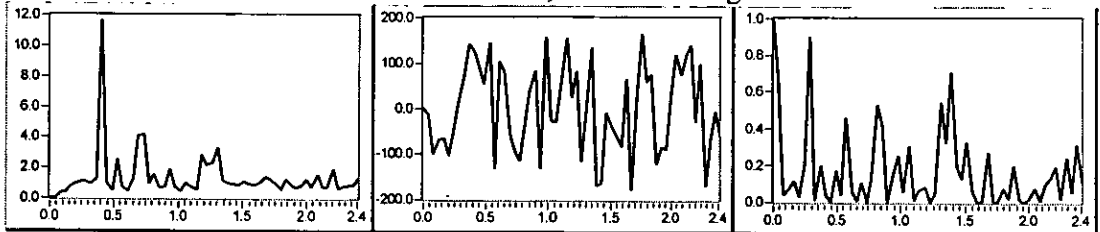
Azotea escalera/Piso 13, dirección longitudinal.



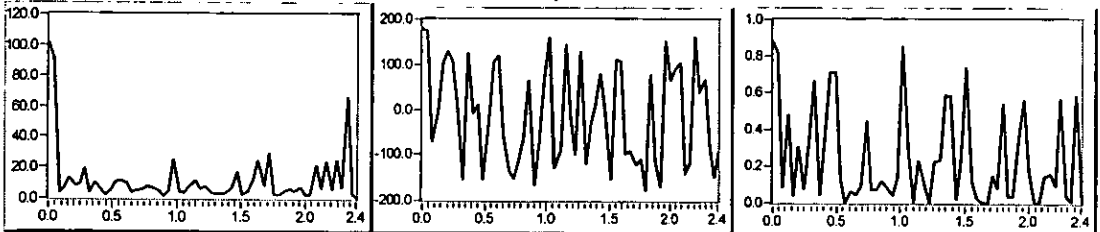
Azotea escalera/Piso 13, dirección transversal.



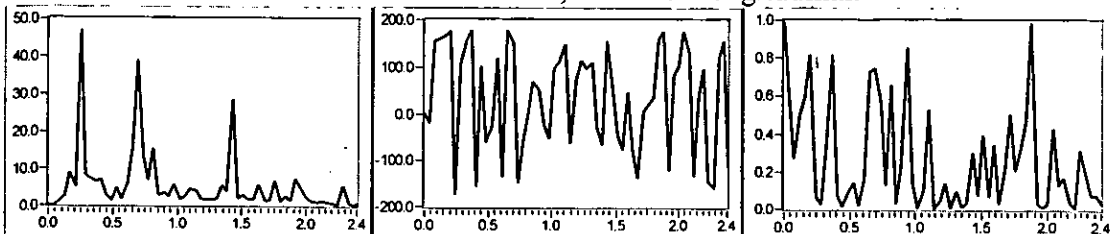
Azotea escalera/Piso 6, dirección longitudinal.



Azotea escalera/Piso 6, dirección transversal.



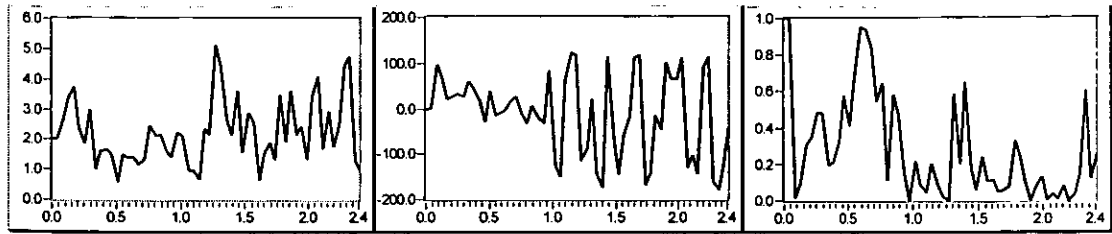
Azotea escalera/Sótano, dirección longitudinal.



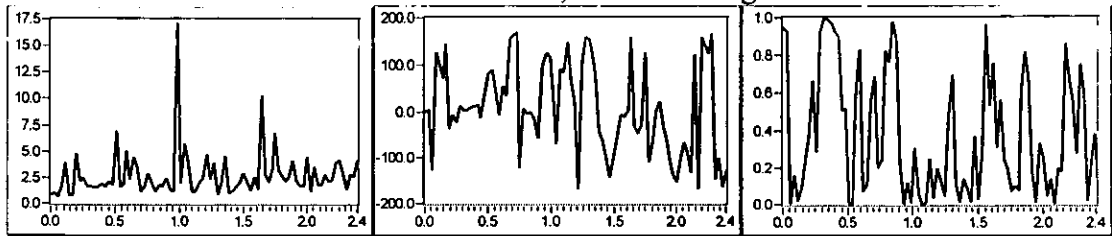
Azotea escalera/Sótano, dirección transversal.

DESPUÉS DEL REFUERZO

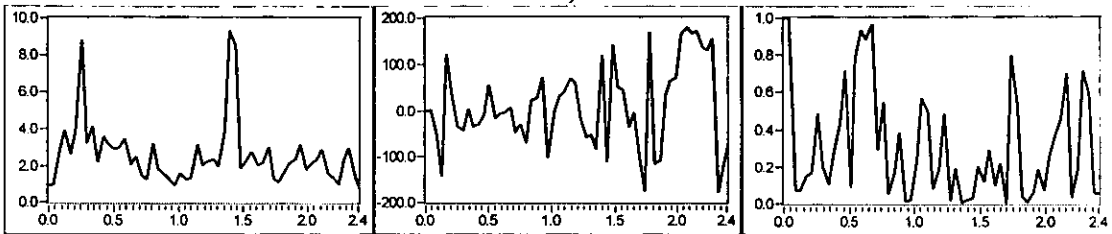
Señal del 13 de junio del 2000



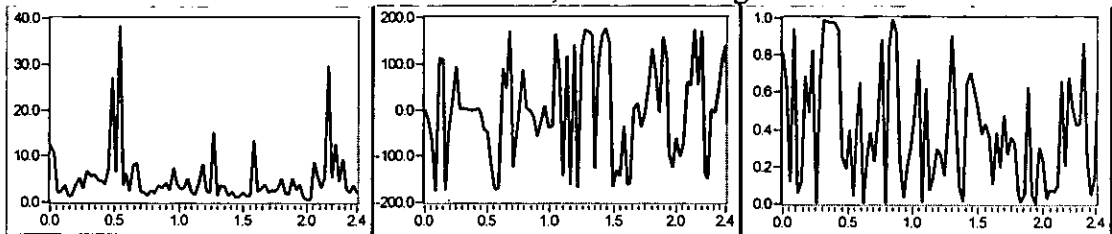
Azotea escalera/Piso 13, dirección longitudinal.



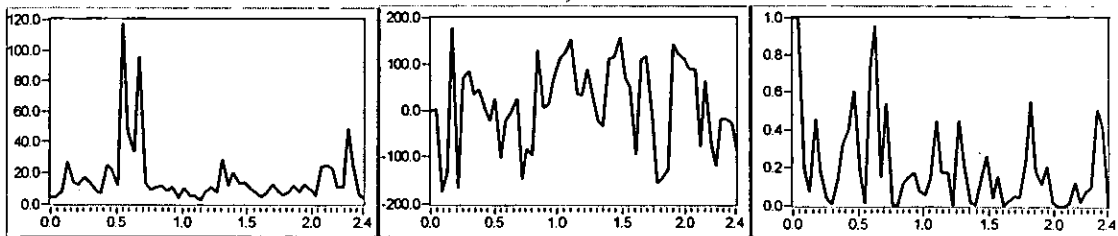
Azotea escalera/Piso 13, dirección transversal.



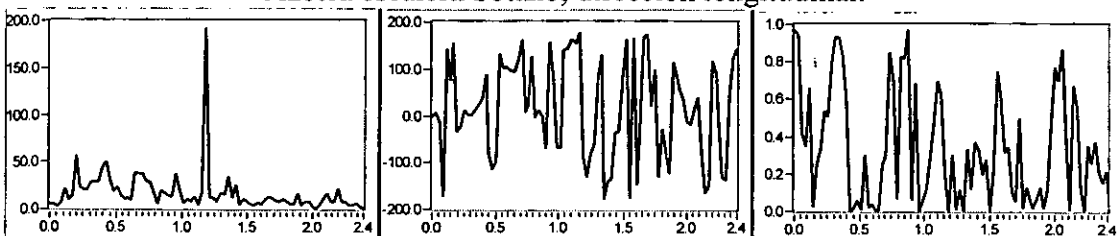
Azotea escalera/Piso 6, dirección longitudinal.



Azotea escalera/Piso 6, dirección transversal.



Azotea escalera/Sótano, dirección longitudinal.

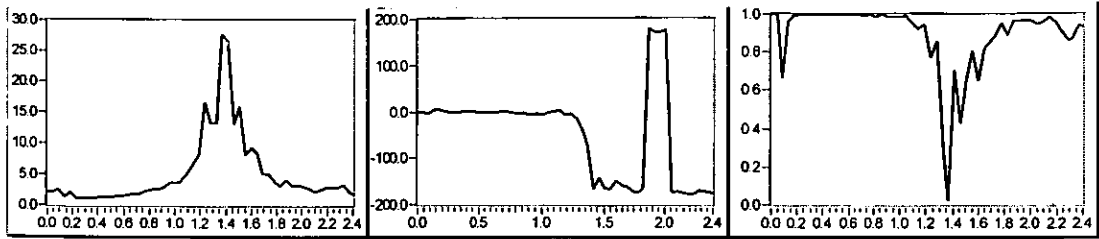


Azotea escalera/Sótano, dirección transversal.

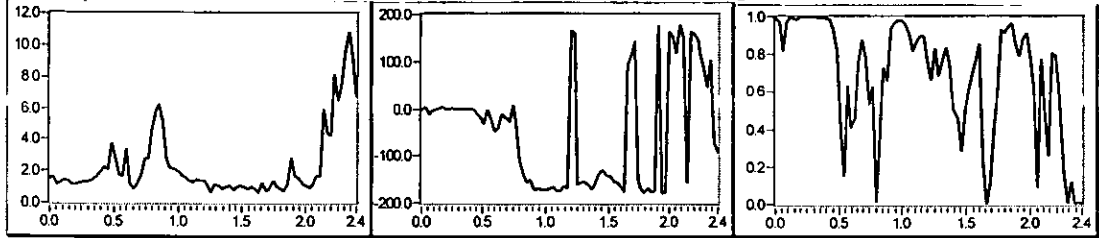
ANEXO 2

A2. ESPECTROS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA, DE FASE Y DE COHERENCIA DE LOS SISMOS REGISTRADOS EN EL EDIFICIO.

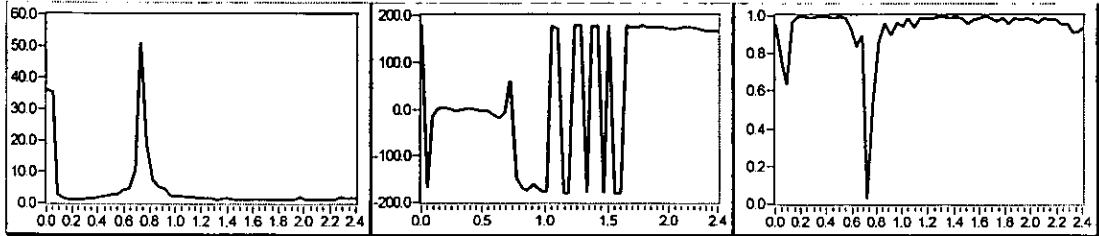
SISMO DEL 15 DE JUNIO DE 1999



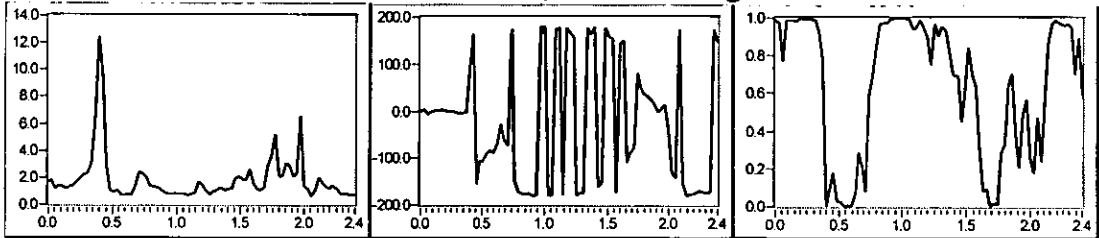
Azotea escalera/Piso 13, dirección longitudinal.



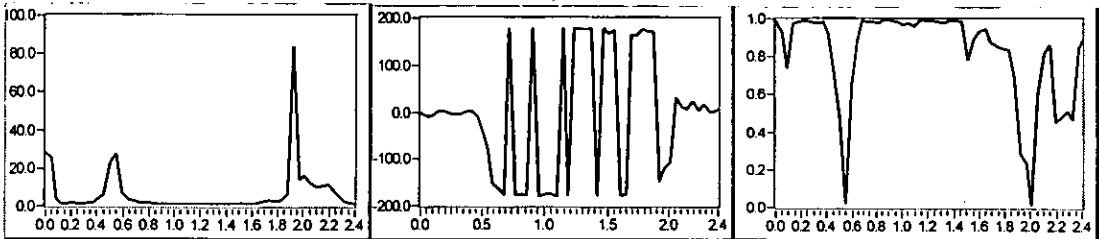
Azotea escalera/Piso 13, dirección transversal.



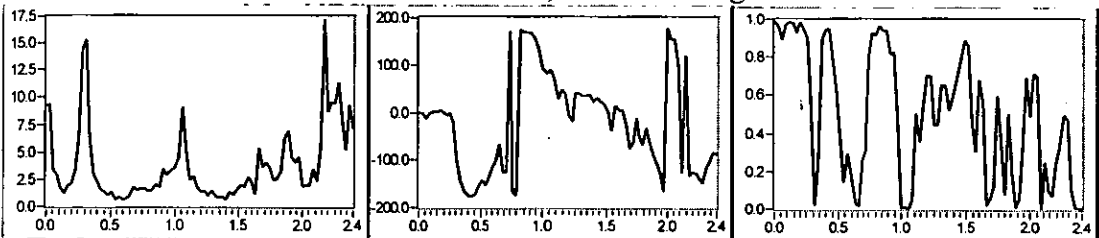
Azotea escalera/Piso 6, dirección longitudinal.



Azotea escalera/Piso 6, dirección transversal.

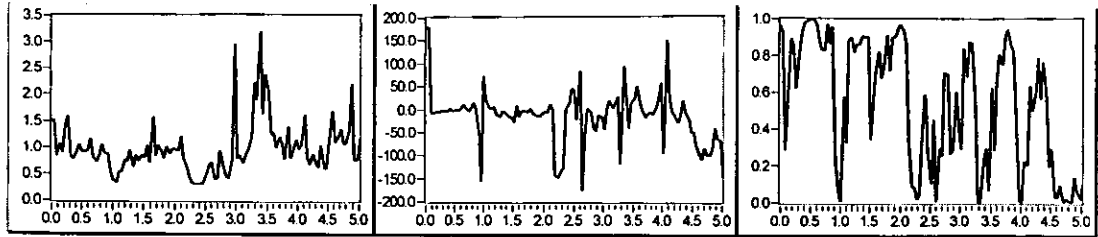


Azotea escalera/Sótano, dirección longitudinal.

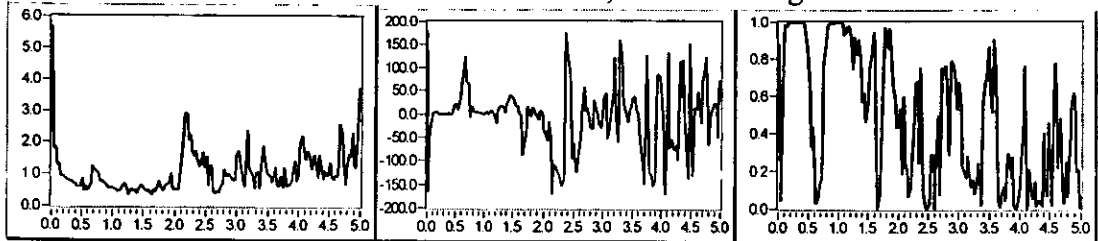


Azotea escalera/Sótano, dirección transversal.

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

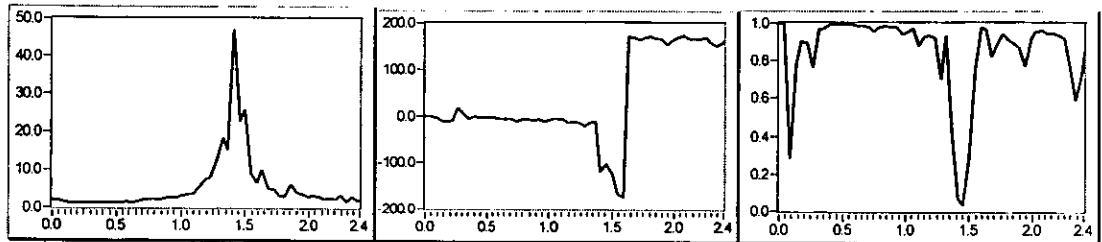


Azotea escalera/Azotea exterior, dirección longitudinal.

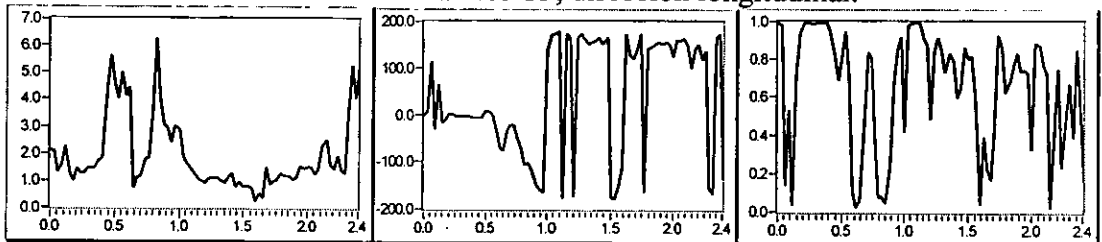


Azotea escalera/Azotea exterior, dirección transversal.

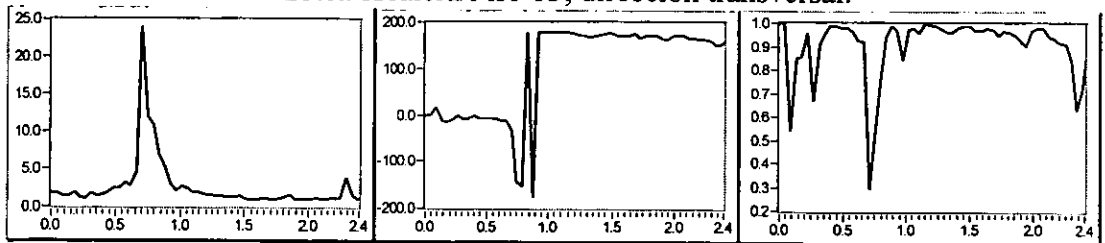
SISMO DEL 21 DE JUNIO DE 1999



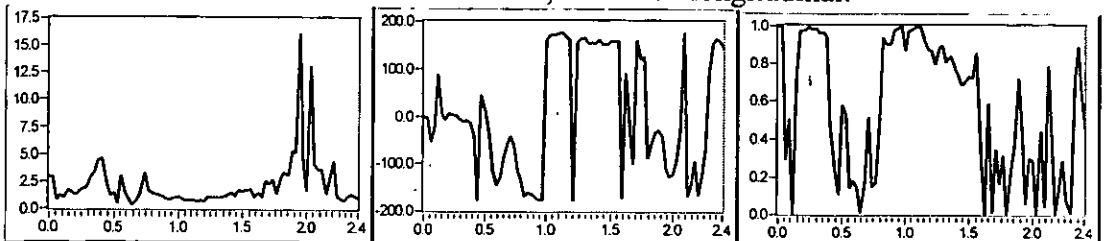
Azotea escalera/Piso 13, dirección longitudinal.



Azotea escalera/Piso 13, dirección transversal.

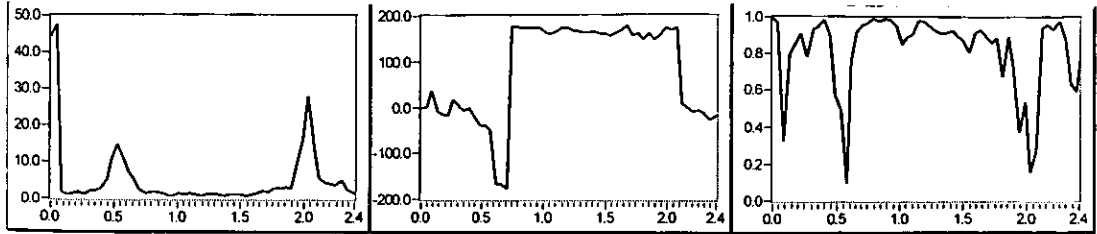


Azotea escalera/Piso 6, dirección longitudinal.

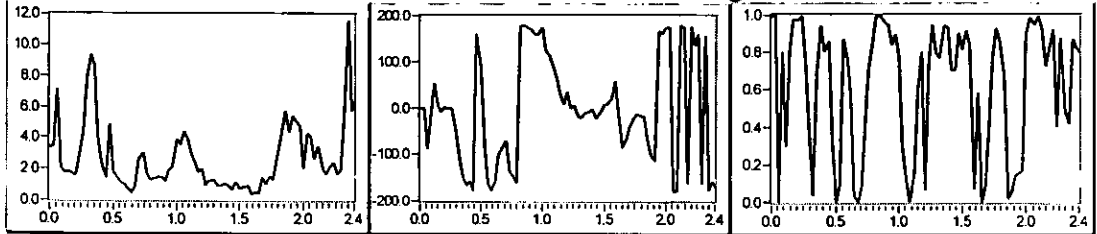


Azotea escalera/Piso 6, dirección transversal.

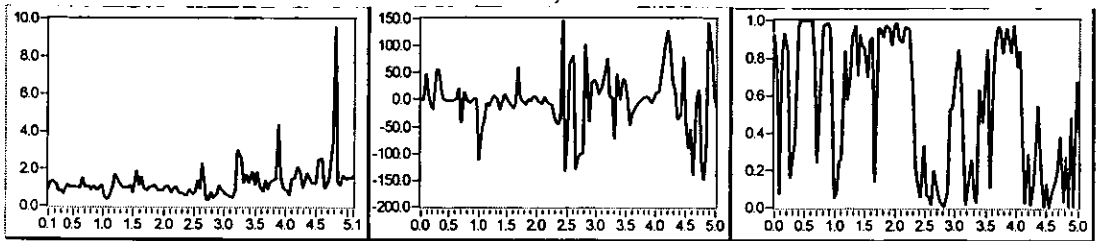
DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA



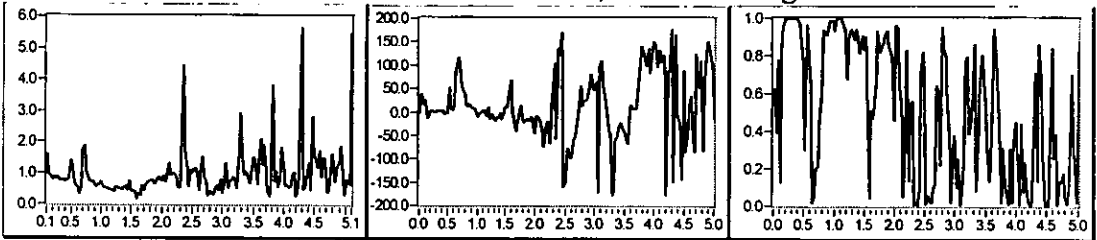
Azotea escalera/Sótano, dirección longitudinal.



Azotea escalera/Sótano, dirección transversal.

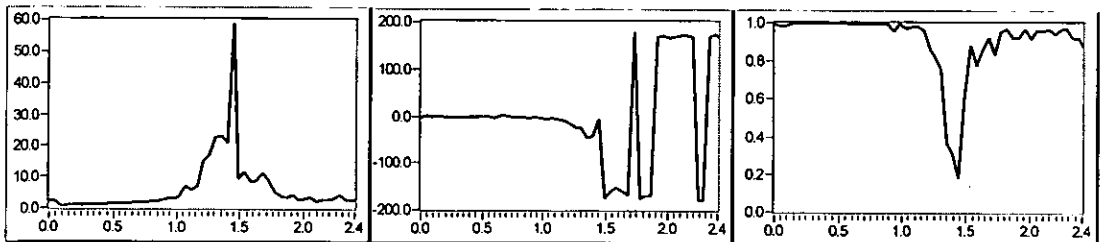


Azotea escalera/Azotea exterior, dirección longitudinal.

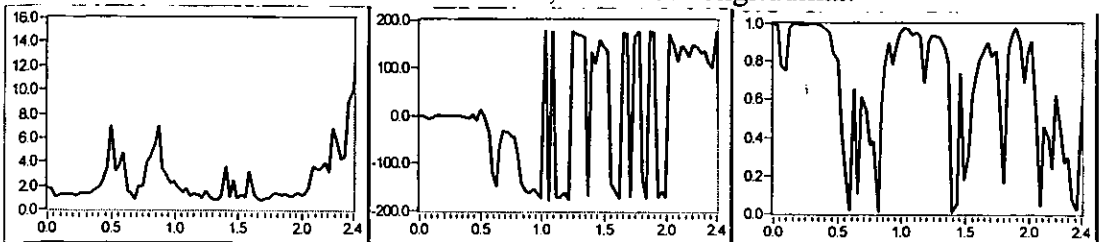


Azotea escalera/Azotea exterior, dirección transversal.

SISMO DEL 30 DE SEPTIEMBRE DE 1999

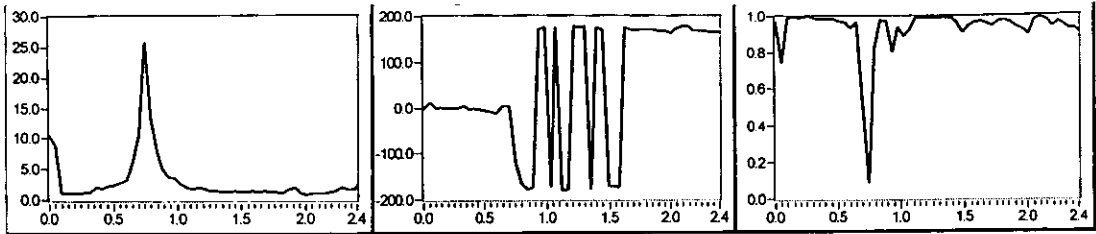


Azotea escalera/Piso 13, dirección longitudinal.

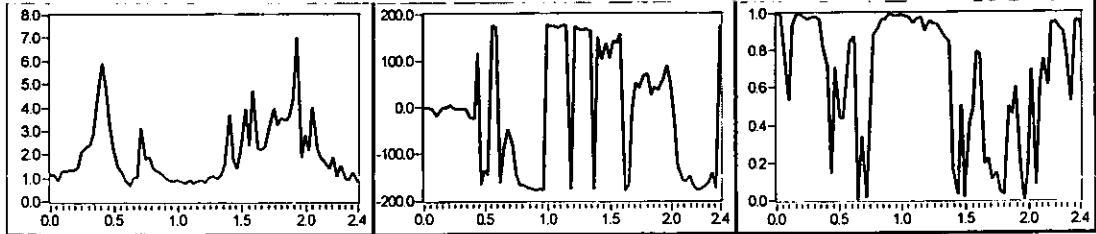


Azotea escalera/Piso 13, dirección transversal.

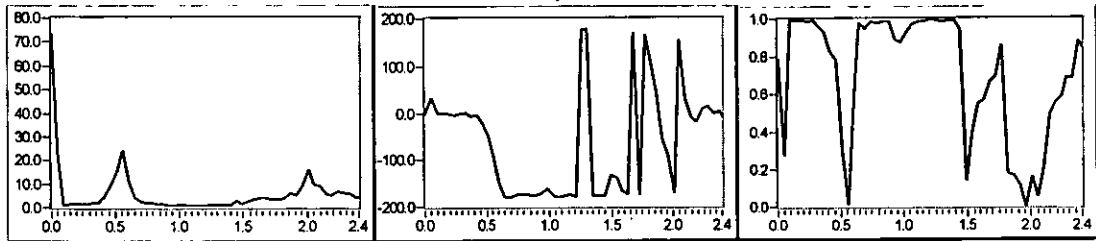
DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA



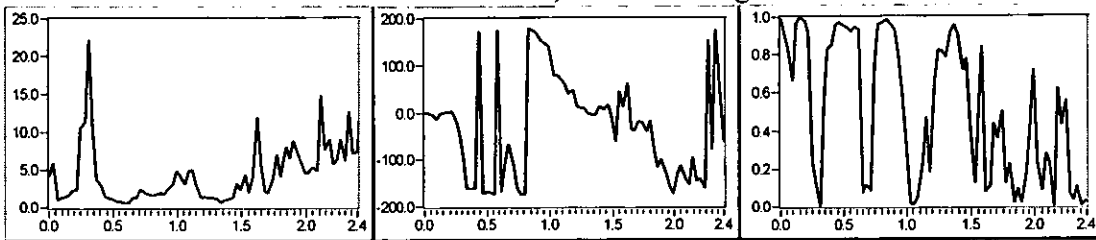
Azotea escalera/Piso 6, dirección longitudinal.



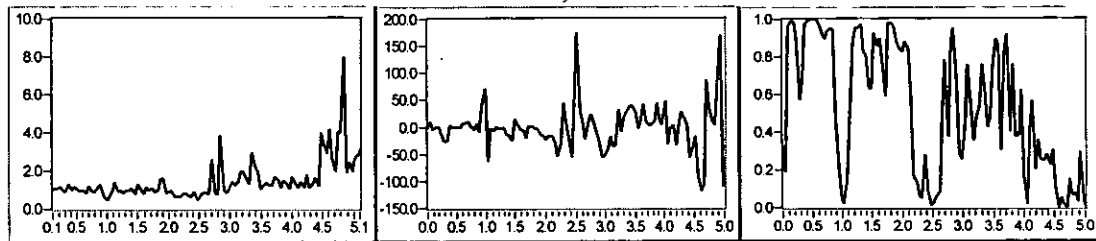
Azotea escalera/Piso 6, dirección transversal.



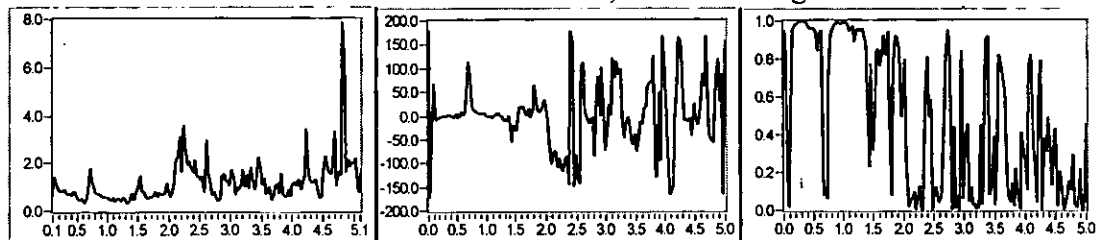
Azotea escalera/Sótano, dirección longitudinal.



Azotea escalera/Sótano, dirección transversal.

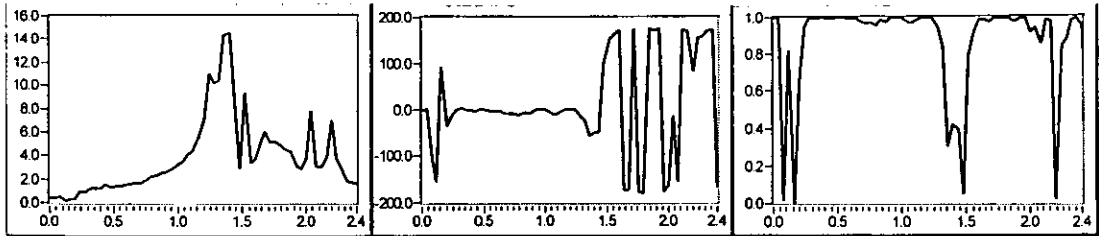


Azotea escalera/Azotea exterior, dirección longitudinal.

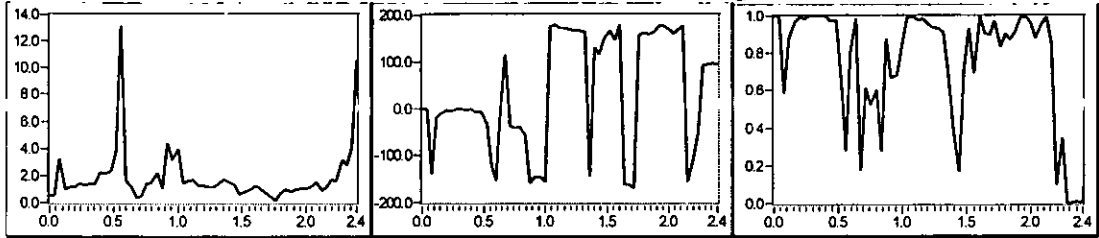


Azotea escalera/Azotea exterior, dirección transversal.

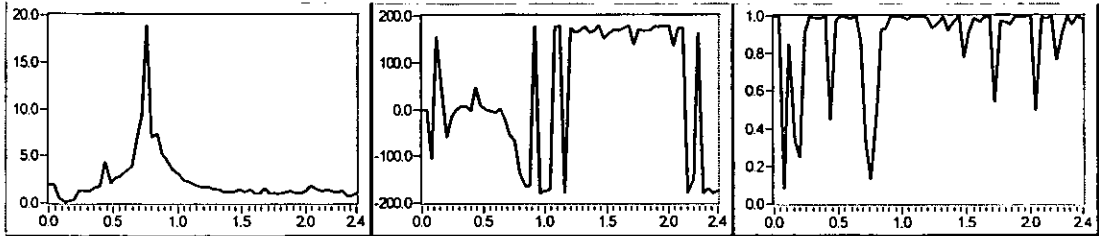
SISMO DEL 28 DE DICIEMBRE DE 1999



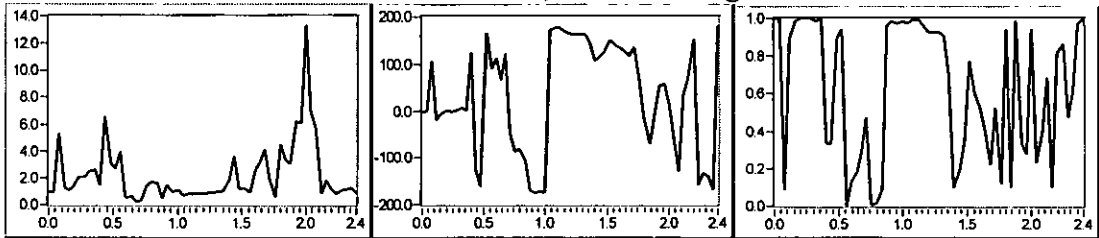
Azotea escalera/Piso 13, dirección longitudinal.



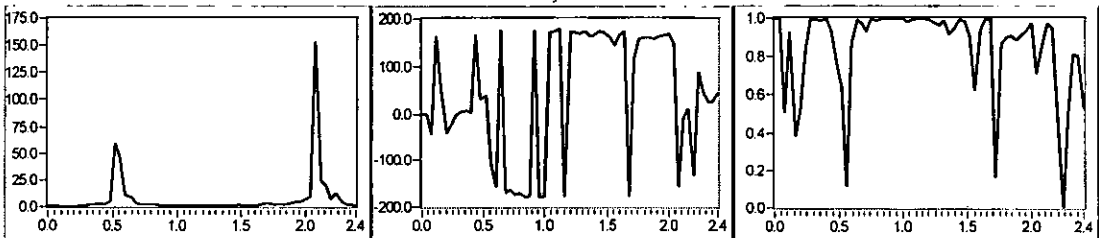
Azotea escalera/Piso 13, dirección transversal.



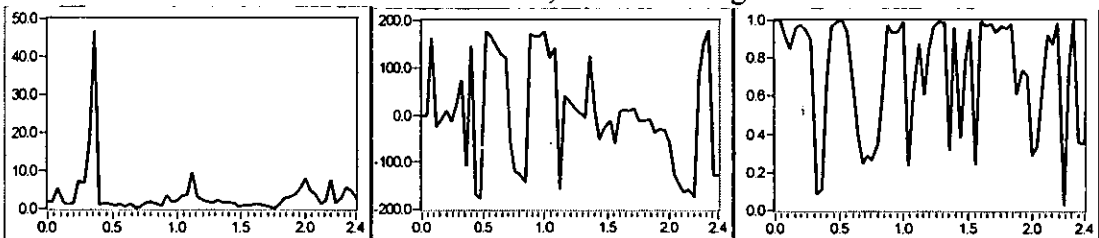
Azotea escalera/Piso 6, dirección longitudinal.



Azotea escalera/Piso 6, dirección transversal.

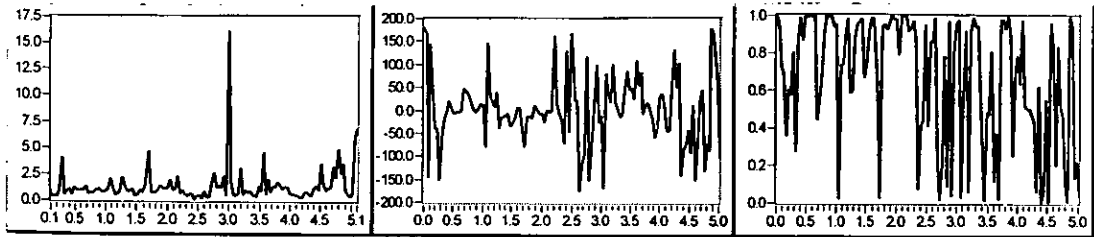


Azotea escalera/Sótano, dirección longitudinal.

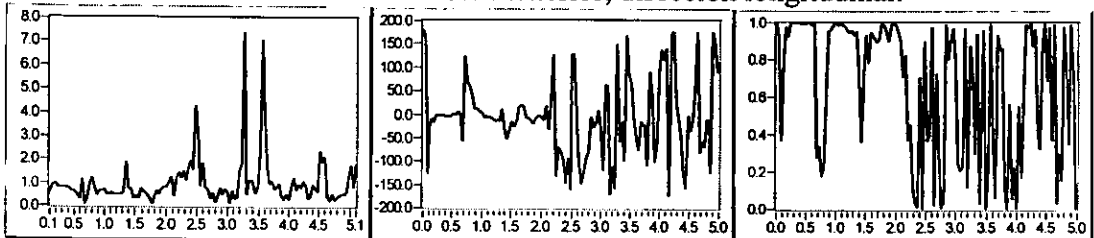


Azotea escalera/Sótano, dirección transversal.

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

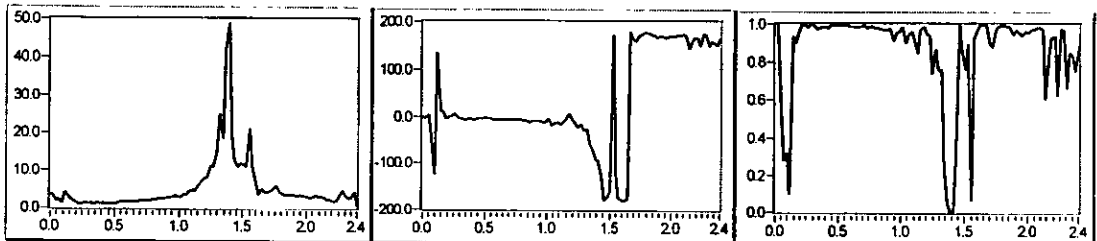


Azotea escalera/Azotea exterior, dirección longitudinal.

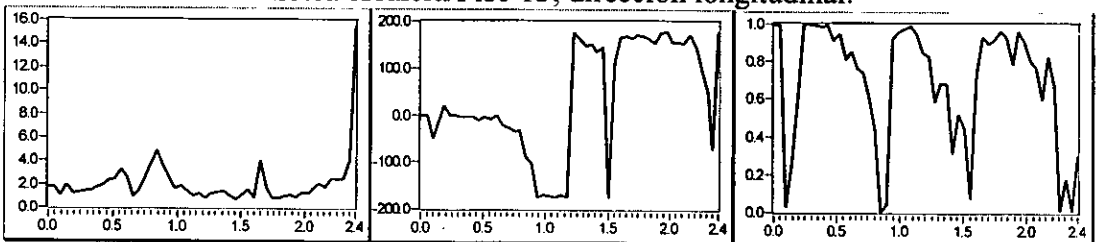


Azotea escalera/Azotea exterior, dirección transversal.

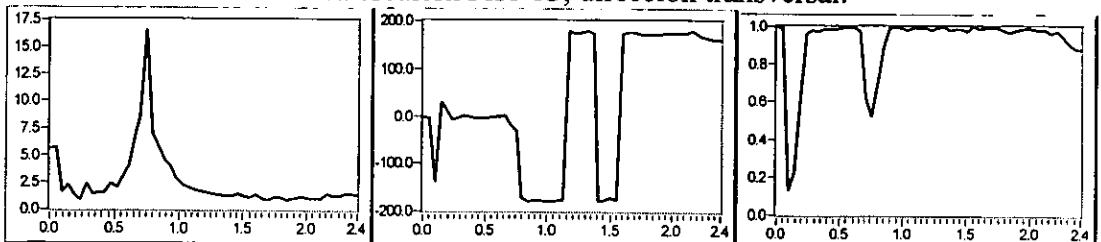
SISMO DEL 21 DE JULIO DE 1999



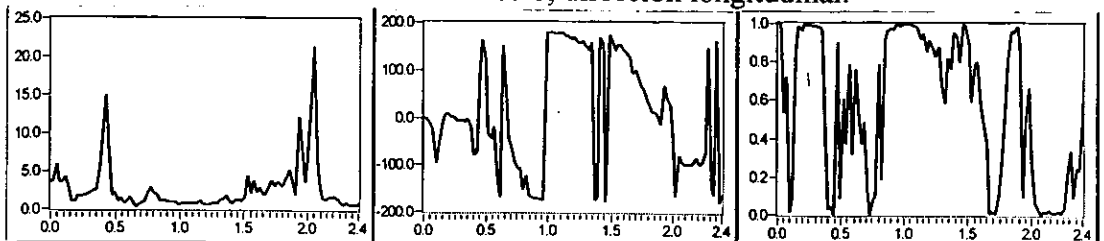
Azotea escalera/Piso 13, dirección longitudinal.



Azotea escalera/Piso 13, dirección transversal.

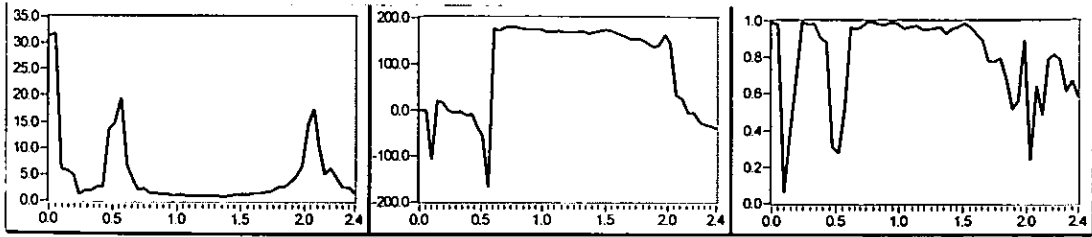


Azotea escalera/Piso 6, dirección longitudinal.

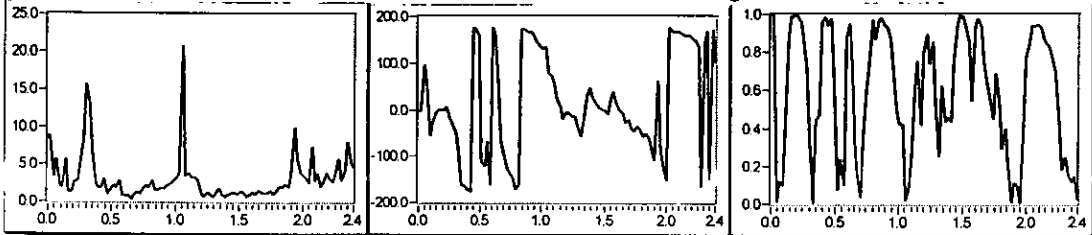


Azotea escalera/Piso 6, dirección transversal.

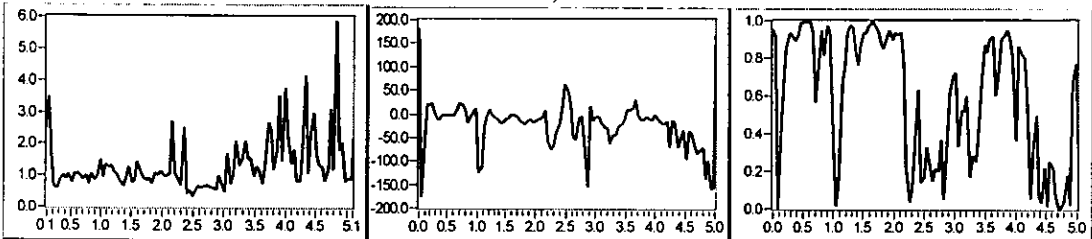
DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA



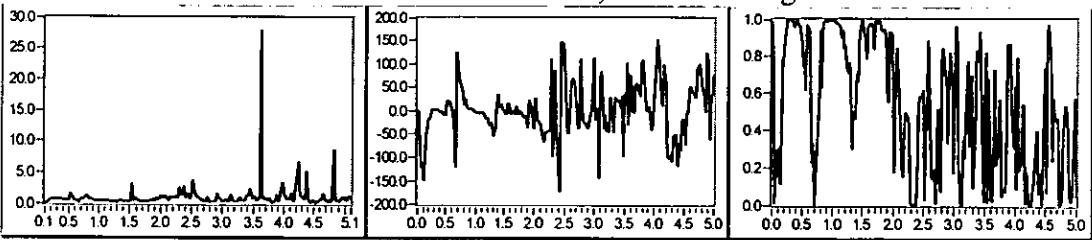
Azotea escalera/Sótano, dirección longitudinal.



Azotea escalera/Sótano, dirección transversal.

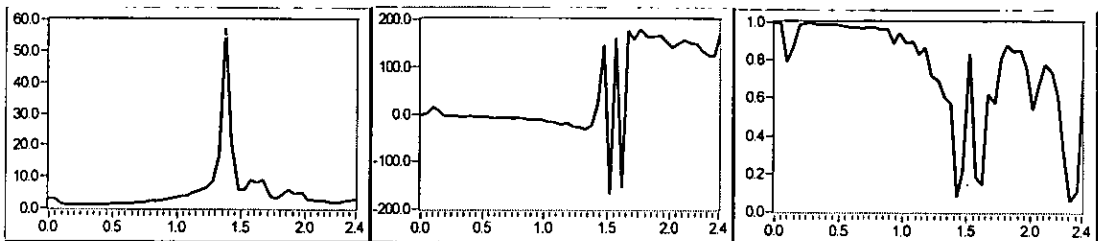


Azotea escalera/Azotea exterior, dirección longitudinal.

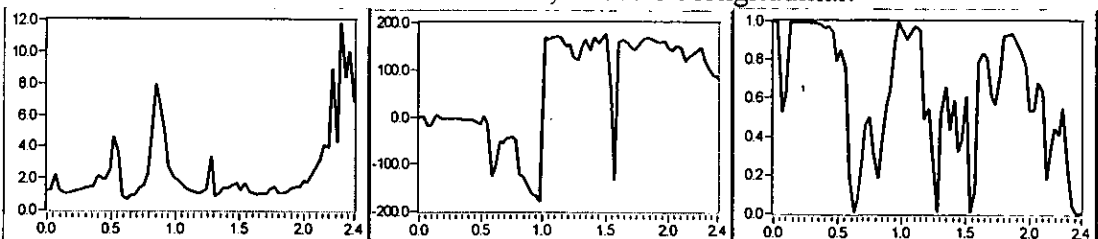


Azotea escalera/Azotea exterior, dirección transversal.

SISMO DEL 9 DE AGOSTO DE 1999

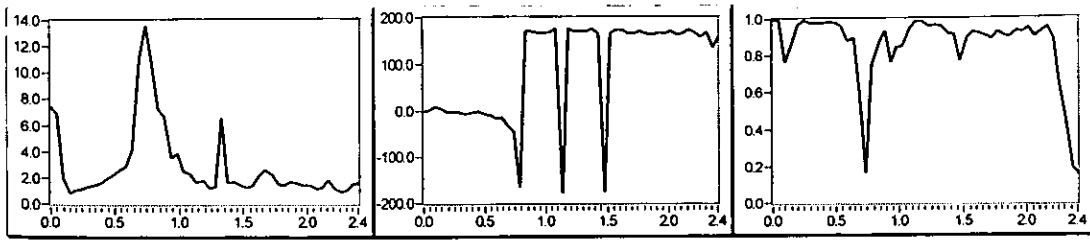


Azotea escalera/Piso 13, dirección longitudinal.

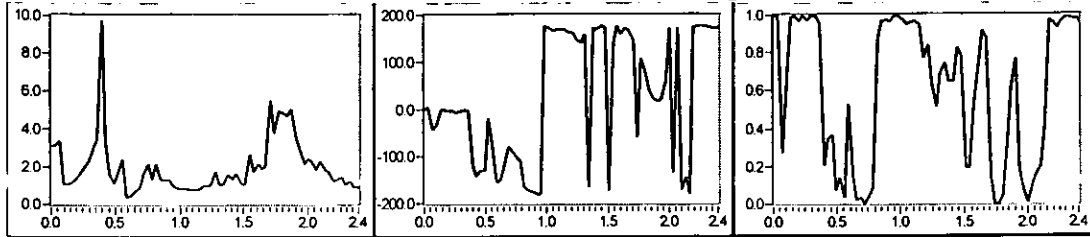


Azotea escalera/Piso 13, dirección transversal.

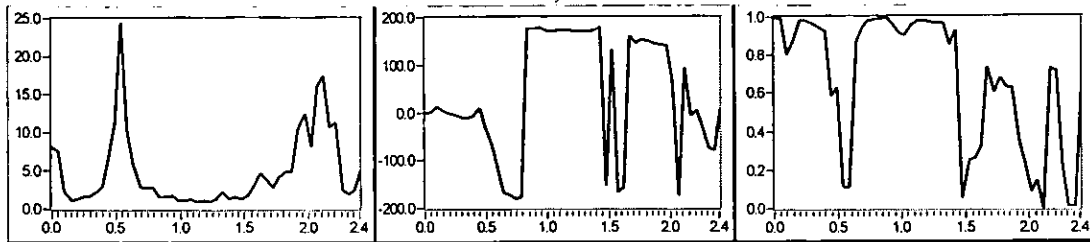
DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
DE UN EDIFICIO REFORZADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA



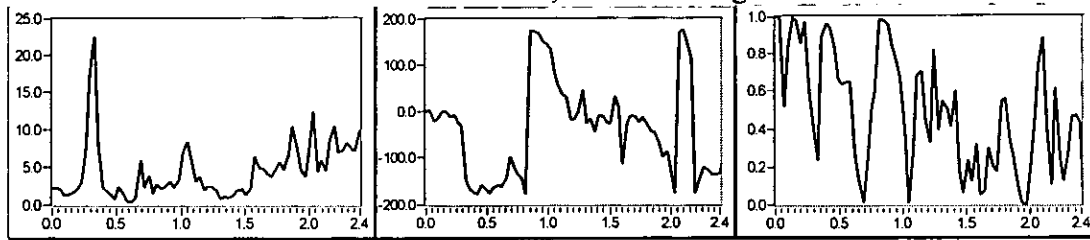
Azotea escalera/Piso 6, dirección longitudinal.



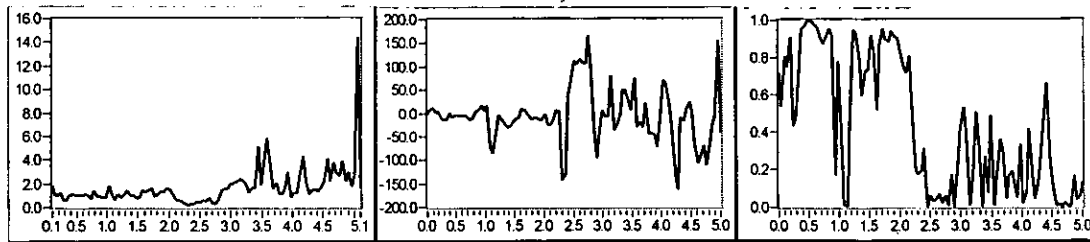
Azotea escalera/Piso 6, dirección transversal.



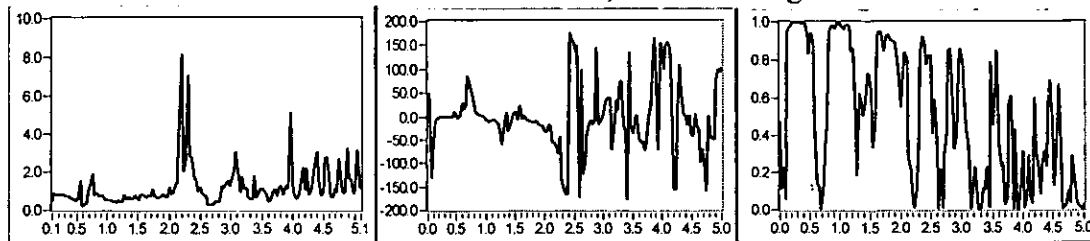
Azotea escalera/Sótano, dirección longitudinal.



Azotea escalera/Sótano, dirección transversal.



Azotea escalera/Azotea exterior, dirección longitudinal.



Azotea escalera/Azotea exterior, dirección transversal.