

109



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA DIVISION DE INGENIERIA CIVIL, TOPOGRAFICA Y GEODESICA.

ANALISIS DINAMICO DE LA PRESA JOSE MA. MORELOS ("LA VILLITA")

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
PRESENTA:
REBECA REYES BOJORQUEZ

DIRECTOR: M.I. REGINALDO JOSE HERNANDEZ ROMERO



MEXICO, D. F.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

2002



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

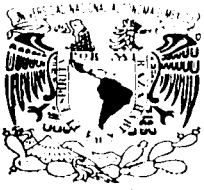


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/048/01

Señorita
REBECA REYES BOJÓRQUEZ
Presente

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

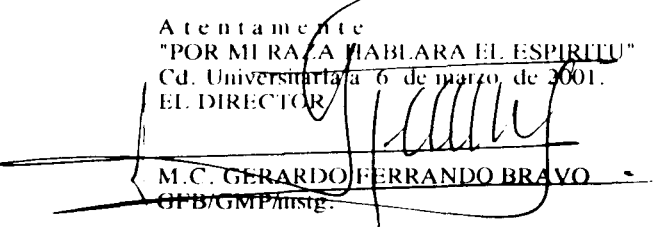
"ANÁLISIS DINÁMICO DE LA PRESA JOSÉ MARÍA MORELOS (LA VILLITA)"

- I. INTRODUCCION**
- II. GENERALIDADES DE LA PRESA**
- III. MÉTODO DE ANÁLISIS**
- IV. COMPORTAMIENTO DINÁMICO**
- CONCLUSIONES**

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universidad a 6 de marzo de 2001.
EL DIRECTOR



M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

A Dios:

Porque gracias a su infinito amor me ha permitido alcanzar uno de mis mayores anhelos. Por ser parte de mi vida desde siempre.

A Lic. Joaquín Reyes Medina con todo mi amor y respeto

Por ser el ejemplo más grande en mi vida, por tu esfuerzo, por tu amor y apoyo incondicional, por enseñarme a seguir adelante aún en contra del mundo, esto es gracias a ti porque sin tu insistencia este momento nunca habría llegado. Te amo papá.....

A la Profra. Ana María E. Bojórquez Avilés con todo mi amor y mi admiración

Porque sin ti nada de esto sería posible, por el trabajo y el sacrificio que representó para ti el darme la oportunidad de alcanzar esta meta, por enseñarme a ver la vida con optimismo, por ser mi gran amiga. Te amo mamá.....

A mi hija Frida Natalia Salazar Reyes mi más grande amor

Por todo lo que representas en mi vida, eres el regalo más hermoso de mi vida, y la mayor motivación que tuve para lograr este anhelo, con la esperanza de que algún día logres alcanzar todas tus metas y realizar en tu vida todo aquello que te haga feliz. Esfuérate y sé valiente.....

A Rubén Salazar Leal

Por todo los momentos que compartimos, por tu apoyo e insistencia para motivarme a lograr lo que juntos anhelamos un día y que hoy se vuelve una realidad en mi vida. Gracias por todo lo que me has dado, por ser un gran compañero y mi mejor amigo. Eres parte de mi existencia, parte de mi misma. Tú has estado presente.....siempre. Con todo mi cariño.....

A mis hermanos Isaías, Joaquín y Samuel

Por su amor y protección, representan en mi vida aquello que me hace fuerte, gracias por estar siempre conmigo.

A Ana Medina Oropeza

Por todo lo que le has regalado a mi vida, por ser un apoyo fundamental para mi y para mi familia , por ser una gran mujer, por la motivación que me diste para ver cumplida mi meta. Te quiero mucho Mane.....

A G R A D E C I M I E N T O S :

A el M.I. Reginaldo José Hernández Romero

Por todo el apoyo brindado en la elaboración de este trabajo, porque su ayuda y orientación como mi director de tesis han sido fundamentales, gracias a usted puedo alcanzar la culminación de uno de mis más grandes anhelos, gracias porque más que un profesor ha sido un gran amigo para mi.....

A el Ing. Alejandro Reyes Medina

Como un reconocimiento por darme la oportunidad de empezar mi vida profesional en I.E.T.S.A, porque el conocimiento y las experiencias que obtuve ahí han sido de gran utilidad en la realización de este trabajo. Por todo lo que aprendí de ti y de todos mis compañeros de trabajo....

A el M. I. Hugo Sergio Haaz Mora y el M.I. Héctor Sanginés

Por su apoyo, la orientación y la insistencia para lograr esta meta.

A la Ing. Araceli A. Sánchez Enríquez

Por que al llegar este momento, quiero agradecerte tu motivación y gran ayuda, por ser una buena amiga, gracias por todo lo que hiciste por mi.

A las señoras Ángela peralta, Alicia Chávez e Inés Mancilla Secretarias de la División de Ingeniería Civil, por la motivación y el apoyo que me brindaron para alcanzar mi objetivo.

CONTENIDO:

Introducción	1
--------------------	---

CAPITULO I

Generalidades de la Presa José Ma. Morelos.....	3
---	---

1.1 Localización	3
1.2 Antecedentes	4
1.2.1 Datos Hidrológicos.....	4
1.2.2 Datos geológicos.....	6
1.3 Descripción General de la Cortina.....	8
1.4 Instrumentación de la Cortina.....	10
1.5 Sismicidad en la Zona.....	15
1.6 Excitaciones de Análisis.....	18

CAPITULO II

Método de Análisis.....	26
-------------------------	----

2.1 Transformada de Fourier.....	26
2.2 Espectro de Respuesta.....	31
2.3 Función de Transferencia.....	32
2.4 Angulo de Fase.....	34
2.5 Función de Coherencia.....	34
2.6 Método de Vibraciones Aleatorias	35

CAPITULO III

Comportamiento Dinámico de la Cortina..... 45

3.1 Efecto de los Sismos sobre la Cortina.....45

3.2 Características de Vibración de la Cortina.....63

CAPITULO IV

Conclusiones..... 102

Bibliografía

INTRODUCCIÓN

La presa **José María Morelos** se construyó para el riego de 18 000 Ha y para la generación de energía eléctrica (304 000 KW). Las características más importante de esta obra fue la construcción de una pantalla de concreto tipo ICOS, considerándose una de las más profundas del mundo, con resultados satisfactorios. De acuerdo con las observaciones realizadas con el sistema de instrumentación geotécnica instalado se deduce que la cortina y la pantalla de concreto han trabajado satisfactoriamente.

En este trabajo se evalúa el comportamiento dinámico que ha tenido la presa **José María Morelos**, que forma parte de la Central Hidroeléctrica "La Villita". El análisis se realiza utilizando la técnica de vibraciones aleatorias con el cual se obtienen las características de vibración de la cortina mediante el calculo de funciones de transferencia, ángulos de fase, funciones de coherencia y los espectros de respuesta calculados a partir de los registros de los sismos ocurridos en la zona. El conocimiento sobre la respuesta dinámica de presas se ha incrementado en los últimos tiempos basándose en la observación de decenas de presas falladas al ser sometidas a vibraciones sísmicas. Con el incremento de este tipo de información y con el desarrollo de los métodos de análisis se pueden representar en forma más realista los factores que inciden en el comportamiento dinámico de presas, como son la geometría de la boquilla, la distribución y el comportamiento no lineal de los materiales (Mejía, 1983), las características de la excitación contemplando la profundidad focal, la directividad y la magnitud.

El comportamiento de presas y terraplenes sometidos a los efectos de un sismo ha sido investigado desde principio de los sesentas del siglo pasado. Durante los últimos años se han alcanzado avances importantes en el conocimiento de la naturaleza del comportamiento de suelos bajo cargas cíclicas desarrollando herramientas que permiten un análisis más amplio en la evaluación de la respuesta dinámica de las presas ante sismos fuertes. A través del estudio de los sismos registrados en el cuerpo de la presa o terraplén es posible demostrar la validez de los métodos analíticos desarrollados hasta el momento.

Desde hace algunos años a la fecha el diseño de las presas se ha apoyado en técnicas modernas de análisis que permiten analizar varias alternativas antes de llegar a la configuración definitiva de una cortina, como es el caso de la presa Aguamilpa construida a finales del siglo pasado y El Cajón y La Parota que se encuentran en la etapa de diseño.

Debido a la importancia que tiene el uso de herramientas numéricas en el diseño de presas, resulta importante evaluar la certidumbre de estos métodos apoyándose en observaciones que se tienen del comportamiento de presas, por tal motivo se estudio el efecto que tienen los sismos en el comportamiento de la presa José María Morelos de tal forma que puedan evaluarse las bondades y errores de las técnicas numéricas. El objetivo de este trabajo es conocer la forma de vibrar de la presa José María Morelos sometida a vibraciones sísmicas ocurridas desde su construcción a la fecha.

1.- GENERALIDADES DE LA PRESA JOSE MA. MORELOS

La presa José Ma. Morelos fue construida de 1964 a 1968, por La Comisión del Río Balsas dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (S.R.H.), para aprovechar las aguas del río Balsas en el desarrollo de energía, riego y el control de avenidas. Consiste básicamente en una cortina de materiales graduados con eje ligeramente curvo hacia aguas abajo, provista de una pantalla de concreto tipo ICOS de 74 m de profundidad máxima, contada a partir del lecho del río, y longitud de 288 m para interceptar el relleno permeable sepultado de grava y arena del cauce. Una obra de excedencias localizada en la margen derecha, del tipo de vertedor provisto de compuertas radiales. Dos túneles en la margen derecha para desvío durante la construcción y posteriormente para aprovechamiento de las tomas de la planta hidroeléctrica. Dos tomas de riego una en cada margen de la cortina. La planta hidroeléctrica que está situada al pie de la cortina.

1.1 Localización

La presa José Ma. Morelos se localiza sobre el río Balsas, aproximadamente a 170 Km al sur de Apatzingan, 55 Km aguas abajo de la presa de Infiernillo y 13 Km aguas arriba de la desembocadura del Balsas en el Océano Pacífico. En la boquilla, el río sirvió como límite a los Estados de Guerrero y Michoacán, quedando en la margen izquierda el municipio de la Unión, Guerrero, y en la margen derecha el de Melchor Ocampo del Balsas Michoacán. (Figura 1.1)

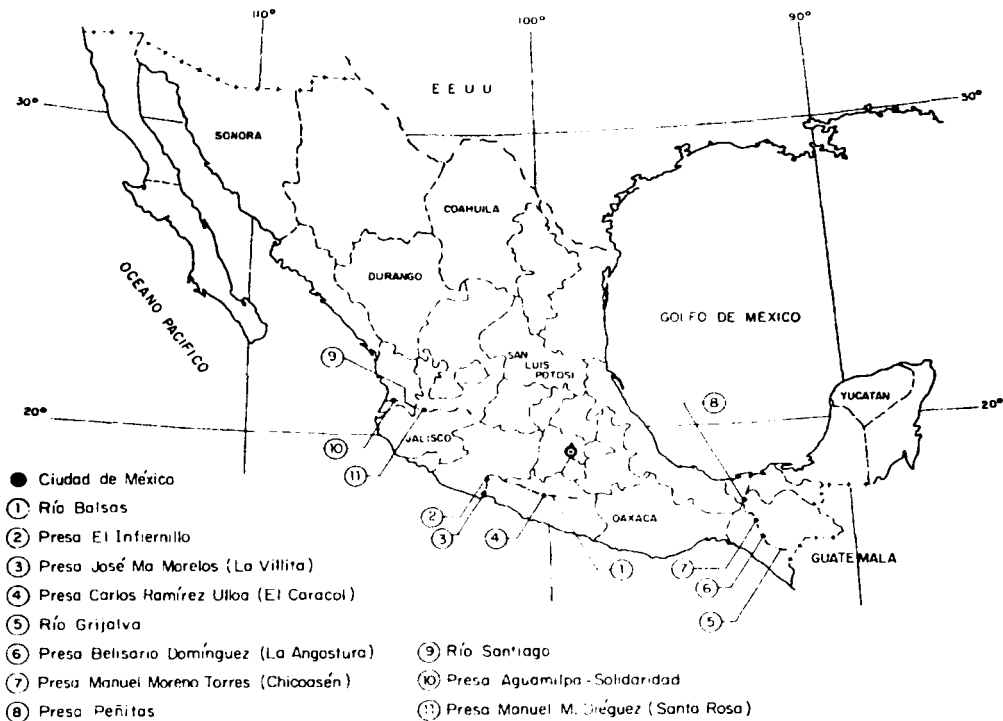


Figura 1.1 Localización de la presa José Ma. Morelos

1.2 Antecedentes

1.2.1 Datos Hidrológicos

Escurrimiento anual:

El régimen de entrada al vaso de la presa, debido a su ubicación, queda totalmente supeditado a las descargas de la presa El Infiernillo. La capacidad de la cuenca está definida por un área de 110 856 Km².

Según datos observados entre los años de 1938 a 1966, se ha presentado un máximo escurrimiento de $23\ 196 \times 10^6 \text{ m}^3$ y un mínimo de $4\ 331 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Durante la construcción de la cortina se presentó en el río Balsas, a la altura de la presa El Infiernillo, una avenida con un gasto superior al máximo registrado, lo que motivó condiciones de trabajo muy severas durante el cierre. La avenida máxima registrada fue de $7\ 000 \text{ m}^3/\text{seg}$.

Capacidad del vaso

Las áreas de inundación son las siguientes:

1) 1 730 Ha a la altura de 39.73 m, correspondiente a la elevación de la cresta del vertedor; 2) 1 850 Ha a la altura de 41.73 m, correspondiente a la elevación del nivel mínimo de operación; 3) 2 400 Ha a la altura de 49.73 m, correspondiente a la elevación del nivel máximo de operación; 4) 2 890 Ha a la altura de 56.73 m, correspondiente a la elevación del nivel de aguas máximas.

La capacidad total del embalse es de 710 millones de m^3 ; de los cuales 330 millones de m^3 corresponden a la capacidad muerta; 180 millones de m^3 a la capacidad útil y los 200 millones de m^3 restantes corresponden al almacenamiento asociado al tránsito de avenidas (NAME).

1.2 .2 Datos Geológicos

Geología regional:

Fisiográficamente la presa se encuentra enclavada en los límites de una planicie costera del Pacífico, en la vertiente occidental de la Sierra Madre del Sur, que se formó por las orogenias ocurridas desde los fines del Cretácico, a principios del Cenozoico. el subsuelo en la zona de la presa está constituido por rocas intrusivas y metamórficas: granitos, pizarras y esquistos, pertenecientes al periodo del paleozoico y por lutitas, areniscas, calcáreas, margas y calizas del Mesozoico. El terciario está representado por derrames ígneos, sedimentos continentales e intrusivos granodioríticos y el cuaternario por aluviones.

El conjunto de rocas metamórficas, volcánicas e intrusivas ha sufrido esfuerzos tectónicos, manifestados por plegamientos y dislocaciones, estas últimas de importancia en sus desplazamientos, formando una estructura de bloques característica de la región. En algunas áreas y coronando prominencias, hay depósitos de aluviones que descansan indistintamente sobre la serie volcánica o sobre las granodioritas y rocas metamórficas, observándose así que el área, ahora bajo activa erosión, era a finales del Terciario una planicie aluvial. Sin embargo, en el proceso fisiográfico general de esta zona costera que por movimientos tectónicos diferenciales entre bloque ha sufrido elevaciones o hundimientos, predomina el de un descenso regional con relación al nivel del mar.

Geología local:

La cortina descansa en la sección del cause sobre potentes acarreos aluviales de gravas y arenas que alcanzan hasta 75 m de espesor y en las laderas está cimentada sobre rocas volcánicas andesíticas alteradas y parcialmente metamorfozadas por los efectos de una intrusión granodiorítica.

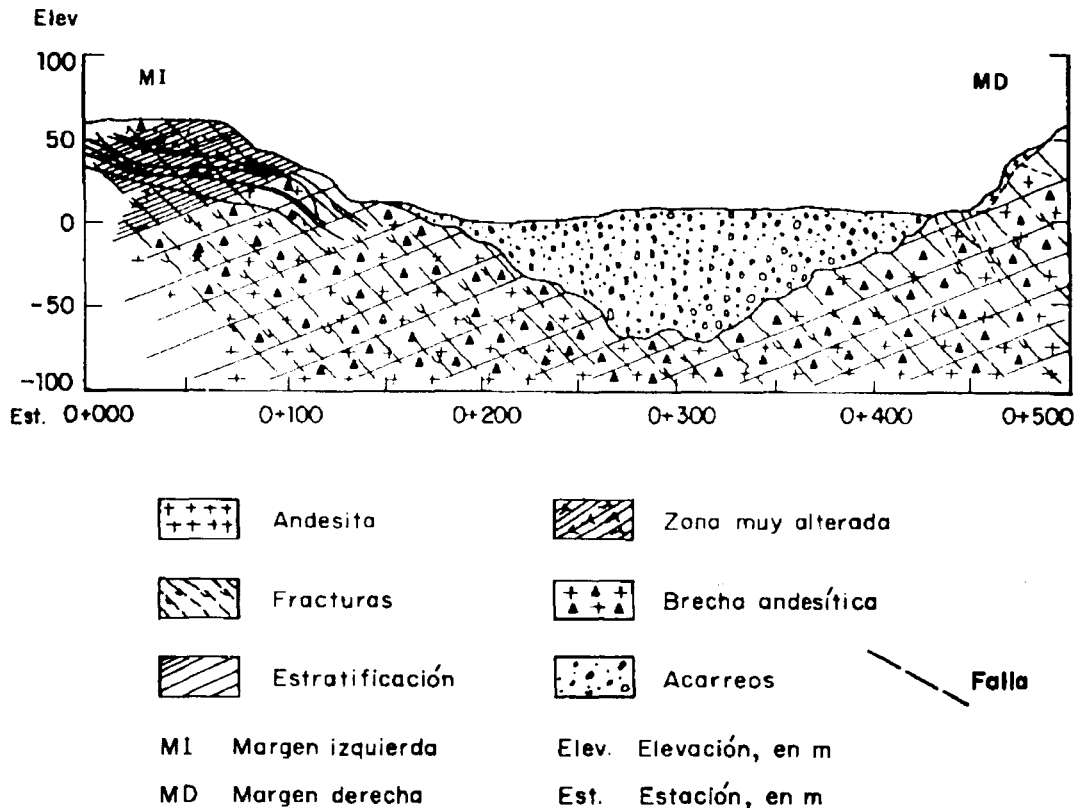


Figura 1.2 Corte Geológico de la boquilla de la presa

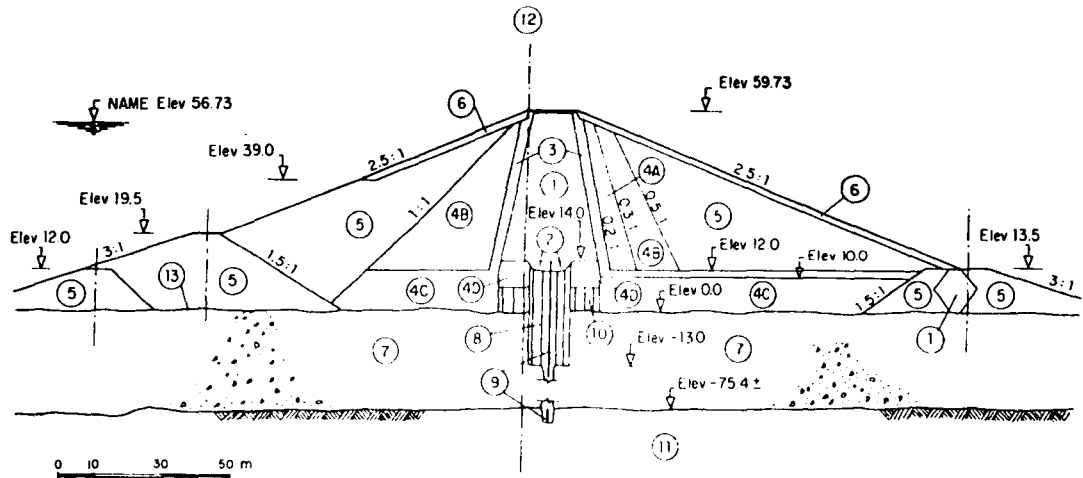
Las rocas volcánicas muestran pseudo estratificación, estando plegadas de tal manera que, en el sitio forman el flanco suroeste de un anticlinal dirigido de NE a SW. El espesor de las capas de andesita es variable y se presenta con intercalaciones de brechas andesíticas masivas y capillas de tobas. La estructura en capas señalada está cortada por una familia bien definida de fracturas tectónicas que prolongándose a profundidad, buzan con echados que varían de 45° a 60° hacia el noroeste, conservando en toda el área un rumbo general de NE a SW (Figura 1.2). Está cruzada en la margen derecha por un sistema de fallas que tienen una dirección general NE.

1.3 Descripción General de la cortina

La presa tiene 60 m de altura en su sección transversal máxima, el ancho de la corona es de 14 m y el ancho de la base de 335 m, su eje es ligeramente cóncavo (curvatura con un radio de 800 m) hacia aguas abajo y la longitud de la corona es de 420 m aproximadamente.

La presa es del tipo de tierra y enrocamiento con corazón impermeable central angosto y simétrico, se construyó con un material arcilloso de alta plasticidad, colocado en capas de 15 cm de espesor y compactado con 8 a 10 pasadas de rodillo pata de cabra, logrando un grado de compactación del 96% respecto a la prueba próctor estándar, provisto en ambos lados de filtros selectos de arena, zonas de transición de grava y arena provenientes de depósitos aluviales, respaldos permeables formados con enrocamientos, chapas de roca selecta para protección contra oleaje y erosión por lluvia y las cuales están

apoyados rellenos aluviales de grava y arena (Figura 1.3). La pendiente de sus taludes exteriores de aguas arriba y aguas abajo es de 3:1.



- | | | |
|---|--|---|
| ① Material impermeable compactado | ④D Grava, arena y rezaga compactadas | ⑩ Inyecciones de compactación |
| ② Arcilla de alta plasticidad | ⑤ Enrocamiento | ⑪ Brecha andesítica |
| ③ Filtros de arena | ⑥ Enrocamiento selecto | ⑫ Eje de la presa |
| ④A Grava y arena bien graduadas | ⑦ Acarreo (grava y arena) | ⑬ Perfil original del terreno |
| ④B Grava y arena | ⑧ Pantalla de inyecciones de consolidación | Elev Elevación, en m |
| ④C Grava y arena colocada a fondo perdido | ⑨ Pantalla de concreto ICOS | NAME Nivel de aguas máximas extraordinarias |

Figura 1.3 Sección Máxima de la presa José Ma. Morelos.

Se aceptó la construcción de una pantalla impermeable constituida por un muro continuo de concreto simple a lo largo del eje de la cortina, tipo ICOS, de 60 cm de espesor, su profundidad máxima es de 94 m, con una longitud de 288 m y su área es de 15 000 m²; empotrada 2 m en la roca andesítica en la

que está labrado el cauce sepultado y en las laderas de ambas márgenes, en la parte superior queda embebida en el corazón impermeable de la cortina.

En virtud de que la presa esta localizada en una región del país de gran actividad sísmica y para reducir los asentamientos y mejorar el confinamiento y resistencia de la pantalla se consideró necesario la construcción de la pantalla de concreto en su contacto con el desplante de la cortina a fin de que pudiera resistir desplazamientos importantes impuestos por esfuerzo cortante sin sufrir daño en sus condiciones de impermeabilidad; para ello fue necesario consolidar e impermeabilizar los aluviones de grava y arena del cauce del río sobre los que se apoya la cortina en una faja aguas arriba de 6 m y aguas abajo del dentellón de 6 m, esto mediante la inyección de una lechada estabilizadora a una profundidad de 26 m bajo el contacto con el núcleo. La pantalla de concreto también se construyó para interceptar los acarrees permeables y profundos de grava y arena del relleno del cauce.

1.4 Instrumentación de la cortina:

Para evaluar el comportamiento geotécnico de la presa **José María Morelos** fueron instalados aparatos de medición, en el cuerpo de la cortina y en la cimentación, especialmente en la pantalla de concreto. La instrumentación fue instalada a lo largo del eje de la presa y en varias secciones paralelas al río (Figura 1.4) , se colocaron 188 aparatos y varias líneas de mojoneras, para observar el comportamiento de la cortina y especialmente de la pantalla profunda de concreto a través del tiempo y comprobar su funcionalidad.

Así mismo y con el objeto de conocer los esfuerzos y las deformaciones en ciertas partes de la estructura, se instalaron por primera vez en México celdas de presión y extensómetros diseñados por CFE.

La instrumentación instalada consiste esencialmente en:

- 1. Piezómetros abiertos:** El gran espesor de los depósitos aluviales interceptados por la pantalla de concreto, hizo necesaria la instalación de un considerable número de piezómetros aguas arriba y aguas abajo de la pantalla, 45 dispuestos para medir la eficiencia de la pantalla construida en el aluvión, para observar los niveles piezométricos y freáticos del agua en el cuerpo de la cortina y en los acarrees de grava y arena; estos últimos se instalaron aguas arriba y aguas abajo de la pantalla de concreto ICOS.

- 2.- Inclinómetros:** para detectar movimientos horizontales en dos direcciones perpendiculares y movimientos verticales, fueron instalados dentro de la pantalla de concreto y en el cuerpo de la cortina.

- 3.- Celdas de presión:** utilizadas para valorar las presiones totales en el corazón impermeable y en los respaldos.

- 4.- Extensómetros:** se encuentran instalados en la ladera de la margen izquierda, utilizados para detectar desplazamientos ante los posibles movimientos incipientes, que podrían presentarse en los planos de fractura.

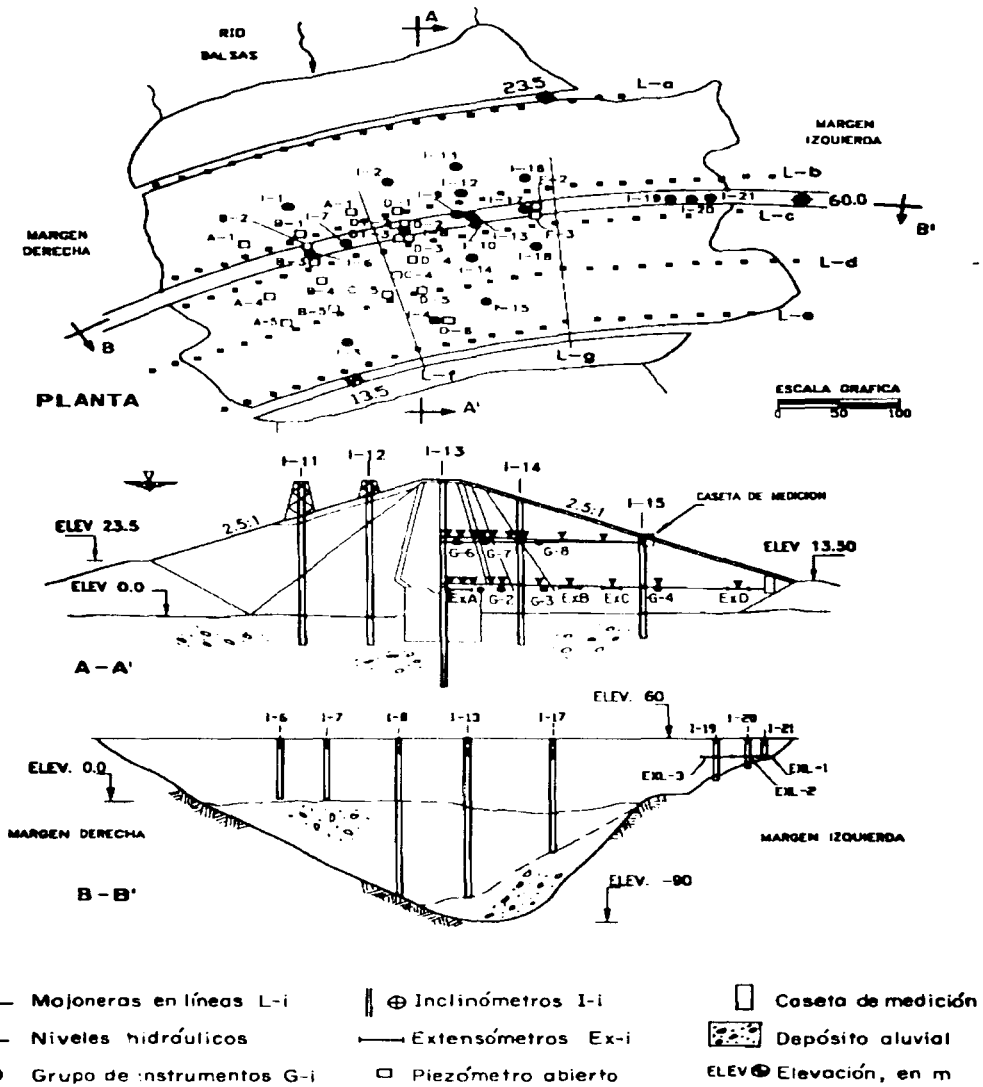
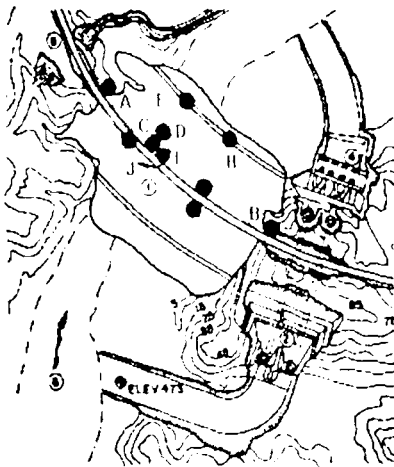


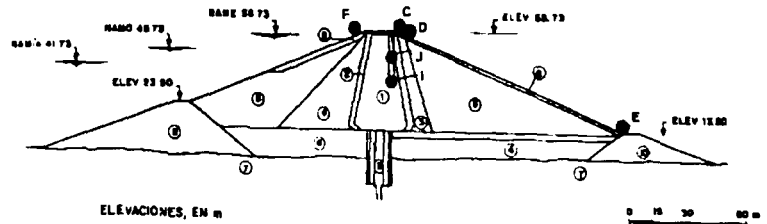
Figura 1.4 Instrumentación instalada en la presa José Ma. Morelos.



ELEV ELEVACIONES, EN m

- ① PRESA
- ② OBRA DE TOMA
- ③ VERTEDOR
- ④ CASA DE MAQUINAS
- ⑤ OBRA DE TOMA PARA RIEGO
- ⑥ RIO BALSAS

● ESTACION ACELEROGRAFICA		
SIGLA	NOMBRE	
A	VILLI	VILLITA MARGEN IZQUIERDA
B	VILD	VILLITA MARGEN DERECHA
C	VILC	VILLITA CORONA CENTRO
D	VILT	VILLITA CORONA TESTIGO
E	VILB	VILLITA BASE CORTINA
F	VILM	VILLITA 0+355 AGUAS ARRIBA
G	VILG	VILLITA 0+355 AGUAS ABAJO
H	VILF	VILLITA 0+355 BASE CORTINA
I	VID1	VILLITA POZO h= 25 m
J	VID2	VILLITA POZO h= 10.5 m



- ① NUCLEO IMPERMEABLE
- ② FILTRO
- ③ REZAGA
- ④ GRAVA - ARENA
- ⑤ ENROCAMIENTO
- ⑥ ENROCAMIENTO PESADO
- ⑦ ALUVION DEL RIO
- ⑧ PANTALLA (CONCRETO)
- ⑨ ATAGUA AGUAS ARRIBA
- ⑩ ATAGUA AGUAS ABAJO

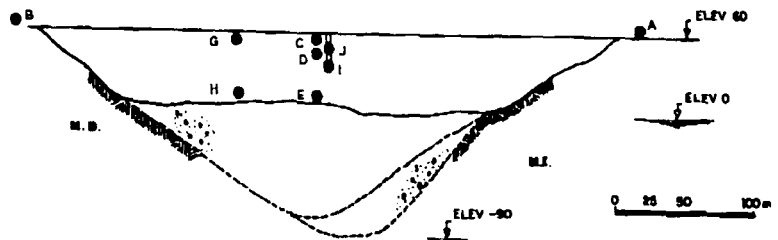


Figura 1.5 Instrumentación sismológica en la presa José Ma. Morelos.

5.- Acelerógrafos: La presa está instrumentada con 10 acelerógrafos, ocho en el cuerpo de la presa en la elevación 60 (puntos C, D, F y G; Figura 1.5), elevación 49.5 (punto J; Figura 1.5), elevación 35 (punto I; Figura 1.5) y 13.50 (punto E y H; Figura 1.5) y dos en la roca uno en cada una de las márgenes al nivel de la corona (puntos A y B; Figura 1.5). Con estos instrumentos, se han registrado sismos de diferentes magnitudes desde 1965 aunque, desafortunadamente, nunca han funcionado en todos en un mismo evento sísmico. Al final de la construcción de esta presa fueron colocados los acelerógrafos indicados en los puntos A, B, C y E; los demás fueron instalados en el periodo de 1987 a 1989 (Figura 1.5).

Los resultados más significativos de la etapa de construcción fueron los siguientes: los asentamientos aumentaron paulatinamente conforme avanzó la construcción, alcanzando 60 cm aguas arriba de la presa y 30 cm aguas abajo en agosto de 1967. En la misma fecha, el asentamiento máximo de la cabeza de la pantalla de concreto fue de 8 cm. Al término de la construcción en diciembre de 1967, y después de una fuerte avenida ocurrida en septiembre que llenó el embalse hasta 12 m abajo del nivel de la corona, el asentamiento máximo aumentó a 100 y 50 cm aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

Los desplazamientos horizontales alcanzaron en el respaldo de aguas arriba valores máximos de 18 cm hacia aguas arriba, mientras que en el respaldo aguas abajo fueron de 17 cm hacia aguas abajo. En la pantalla de concreto, los valores registrados fueron de menores de 3 cm.

Respecto a la medición de esfuerzos en la presa, se obtuvieron los siguientes resultados:

- 1). Los esfuerzos verticales alcanzaron valores máximos de 8 Kg/cm^2 en la zona de transición de la presa, disminuyendo a medida que se alejan del núcleo.
- 2). Una concentración de esfuerzos aparece en la zona de transición a la elevación 29.
- 3). Los esfuerzos horizontales tanto en la dirección normal como paralela al río son pequeños en la elevación 29 y alcanzan valores de 5 Kg/cm^2 aproximadamente a la elevación 10.

1.5 Sismicidad en la zona

La presa **José Ma. Morelos** se localiza en la zona de alta sismicidad asociada a la subducción de la placa de Cocos bajo la placa Norteamericana. Desde el punto de vista de sismos someros la sismicidad en México es la más alta de todo el hemisferio Occidental (Gutenberg y Richter, 1954) y afecta en forma marcada a los estados de Jalisco, Colima, Oaxaca, Chiapas, Guerrero y Michoacán. Partiendo del embalse de la presa El Infiernillo hasta llegar al mar, el bajo balsas forma la frontera natural entre Michoacán y Guerrero, y se localiza en una de las áreas de mayor sismicidad dentro de la zona de

subducción. A pesar de que estos dos estados tienen un largo historial de actividad sísmica, para describir la sismicidad en la zona de la presa La Villita sólo se tomarán en cuenta los temblores que se han registrado instrumentalmente hasta los primeros meses del año 2000. Desde su construcción la presa ha sido sometida a cargas dinámicas provocadas por eventos sísmicos de diferentes magnitudes. Con la instrumentación dinámica se han podido registrar un total de 220 sismos de magnitud mayor que 2.

La región queda comprendida entre las latitudes 16° a 20° N y las longitudes 100° a 104° W. La presa está localizada entre la falla de Chilpancingo y la del Pacífico, teniendo varios focos sísmicos a menos de 50 Km de distancia.

Para obtener las características de vibración de la presa en estudio, primero fue necesario acoplar en tiempo todos los registros obtenidos de cada sismo. La localización de los epicentros de los sismos utilizados se presenta en la figura 1.6. En ésta se aprecia la ubicación de los sismos que han afectado a la cortina y cuya localización se encuentra principalmente en los estados de Michoacán y Guerrero y en su costas.

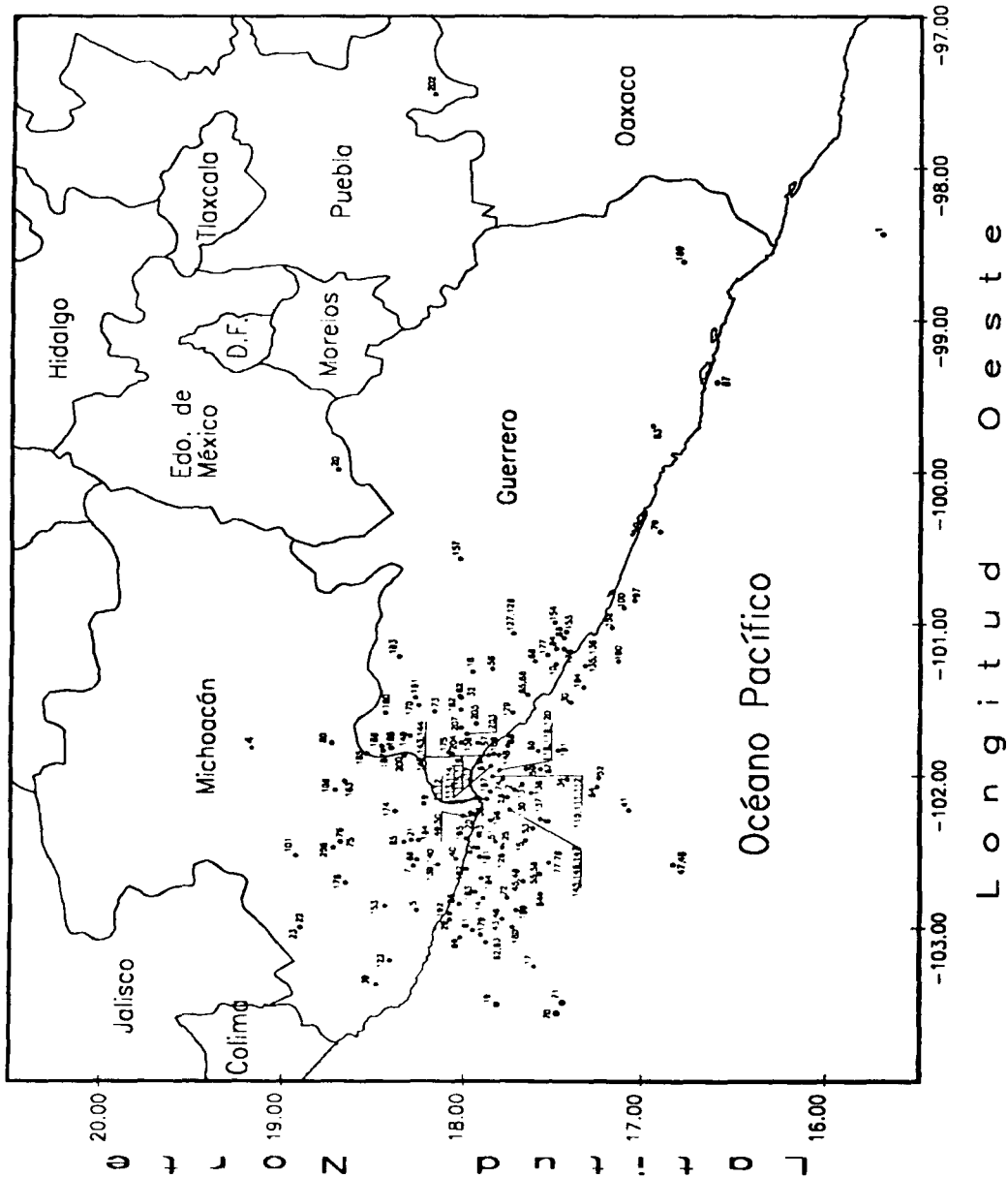


Figura 1.6 Ubicación de los epicentros de los sismos registrados en la presa José Ma. Morelos

1.6 Excitaciones de análisis

Para el estudio realizado se utilizaron los sismos registrados por un acelerógrafo en algún sitio cercano a la presa; tal es el caso de los registros de los sismos en las márgenes de la cortina. En la tabla 1.1 se concentran las características importantes de los sismos registrados por la instrumentación instalada en la cortina, con magnitud mayor a 2 grados en la escala de Richter.

Como es posible observar en la figura 1.5 los sismos se han presentado principalmente frente a las costas de Guerrero y Michoacán, en la zona llamada de subducción. Así también se observa como otros sismos han ocurrido en la zona denominada de falla normal que es característica de sismos en el continente.

Los sismos registrados en la roca de la margen derecha de la presa **José Ma. Morelos** están influenciados por la cortina y las obras de excedencias y de generación, por encontrarse estas obras en ambos extremos del acelerógrafo. En reportes de las visitas de inspección se ha indicado que el material de

desplante del acelerógrafo de la margen derecha ésta menos alterado que el de la margen izquierda, incluso se ha mencionado que el material de esta última ha sufrido deslave por lluvia.

No.	No. Evento	Sismo	Magnitud Richter	Profundidad Focal (Km)	Distancia del epicentro a la presa (Km)
1	1	Enero 2, 1972	Mb= 6 20	33	475 24
2	1	Julio 21, 1972	M= 4 80	33	30 30
3	1	Junio 21, 1972			
4	1	Julio 3, 1973	Mb= 5 70	125	135 80
5	1	Enero 30, 1973	Ms= 7 50	43	80 79
6	1	Octubre 17, 1973	Mb= 4 70	202	890 15
7	1	Enero 4, 1975	Mb= 4 90	<5	54 55
8	1	Octubre 11, 1975	Mo= 5 50	33	44 51
9	1	Noviembre 15, 1975	Mb= 5 90/ Ms= 5 90	<5	26 82
10	1	Marzo 14, 1979	Mb= 7 00	<5	113 68
11	1	Octubre 25, 1981	Mb= 6 10/ Ms= 7 30	<5	11 84
12	2	Octubre 25, 1981		<5	11 84
13	3	Octubre 25, 1981	Mb= 4 50	<5	22 62
14	4	Octubre 25, 1981		<5	66 50
15	1	Octubre 30, 1981	Mo= 4 10	33	42 88
16	1	Noviembre 1, 1981	Mc= 5 50	<5	95 11
17	1	Noviembre 11, 1981		<5	121 38
18	1	Diciembre 29, 1981			
19	1	Diciembre 30, 1981		<5	142 62
20	1	Enero 14, 1982	Mo= 4 10	33	251 08
21	1	Diciembre 8, 1983	Mb= 5 50	6	42 41
22	1	Mayo 28, 1985	Mb= 5 20	<5	134 17
23	2	Mayo 28, 1985	Mb= 5 20	<5	134 17
24	1	Junio 2, 1985			
25	2	Junio 2, 1985			
26	1	Junio 19, 1985	Mb= 4 40	<5	70 42
27	1	Julio 26, 1985			
28	1	Agosto 26, 1985		<5	24 59
29	1	Septiembre 19, 1985	Mb= 6 80/ Ms= 8 10/ Mc= 8 10	15	81 95
30	2	Septiembre 19, 1985	Mc= 4 30	<5	96 55
31	3	Septiembre 19, 1985			
32	1	Septiembre 21, 1985	Mb= 6 30/ Ms= 7 60/ Mc= 7 50	15	76 94
33	2	Septiembre 21, 1985			
34	3	Septiembre 21, 1985		<5	62 41

Tabla 1.1 Características principales de los sismos utilizados

No	No. Evento	Sismo	Magnitud Richter	Profundidad Focal (Km)	Distancia del epicentro a la presa (Km)
35	4	Septiembre 21, 1985			
36	5	Septiembre 21, 1985	Mc= 3.10	25	7.35
37	6	Septiembre 21, 1985			
38	7	Septiembre 21, 1985			
39	1	Septiembre 22,1985		<5	138.39
40	2	Septiembre 22,1985	Mc= 3.20	20	38.52
41	3	Septiembre 22,1985		<5	97.51
42	4	Septiembre 22,1985	Mb= 4.10	<5	30.77
43	1	Septiembre 24,1985	Mb= 4.50	<5	83.65
44	2	Septiembre 24,1985			131.41
45	3	Septiembre 24,1985	Mb= 4.50	<5	63.68
46	4	Septiembre 24,1985	Mb= 4.50	<5	83.65
47	5	Septiembre 24,1985		<5	131.41
48	6	Septiembre 24,1985	Mb= 4.50	<5	63.68
49	1	Septiembre 25, 1985	Mb= 5.30	<5	8.15
50	2	Septiembre 25, 1985	Mb= 5.30	<5	8.15
51	1	Septiembre 27, 1985	Mb= 4.70	<5	30.70
52	1	Octubre 2, 1985	Mc= 3.60	7	81.41
53	1	Octubre 3, 1985	Mc= 3.40	32	42.34
54	1	Octubre 4, 1985	Mc= 4.00	<5	79.08
55	1	Octubre 29, 1985	Mb= 5.60/ Ms= 5.40/ Mc= 5.10	20	64.66
56	2	Octubre 29, 1985	Mb= 5.60/ Ms= 5.40/ Mc= 5.10	20	64.66
57	1	Noviembre 23, 1985		<5	44.66
58	1	Diciembre 5, 1985	Mb= 3.70/ Mc= 4.40	10	98.56
59	1	Diciembre 10, 1985	Mc= 3.60	32	43.39
60	1	Diciembre 23, 1985		<5	57.51
61	1	Enero 12, 1986	Mb= 5.10/ Mc= 4.70	<5	32.85
62	1	Enero 27, 1986	Mc= 4.70	<5	97.87
63	2	Enero 27, 1986	Mc= 4.70	<5	97.87
64	1	Febrero 6, 1986	Mc= 3.80	32	76.25
65	1	Febrero 7, 1986	Mb= 4.90/ Mc= 4.70	20	87.01
66	1	Febrero 7, 1986	Mb= 4.90/ Mc= 4.70	20	87.01
67	1	Febrero 10, 1986		<5	50.59
68	1	Marzo 18, 1986	Mb= 4.60/ Mc=4.50	<5	110.08
69	1	Abril 30, 1986	Mb= 6.20/ Ms= 7.00/ Mc= 6.40	20	93.79

Tabla 1.1 Características principales de los sismos utilizados

	No. Evento	Sismo	Magnitud Richter	Profundidad Focal (Km)	Distancia del epicentro a la presa (Km)
70	2	Abril 30, 1986		<5	157.65
71	3	Abril 30, 1986		<5	151.77
72	1	Mayo 5, 1986	Mb= 5.60/ Ms= 5.50/ Mc= 5.60	20	69.85
73	1	Junio 19, 1986	Mb= 5.20/ Mc= 4.80	10	69.63
74	1	Noviembre 4, 1986	Mb= 4.80/ Mc= 4.80	15	27.72
75	1	Noviembre 26, 1986	Mc= 5.00	<5	79.75
76	2	Noviembre 26, 1986	Mc= 5.00	<5	79.75
77	1	Diciembre 24, 1986		<5	63.80
78	1	Diciembre 24, 1986		<5	63.80
79	1	Mayo 30, 1987		67	226.37
80	1	Julio 26, 1987	Mb= 5.00	67	92.17
81	1	Agosto 29, 1987	Mb= 4.20	<5	88.67
82	1	Septiembre 10, 1987	Mc= 2.60	7	77.97
83	1	Noviembre 7, 1987	Mc= 2.70	50	292.24
84	1	Febrero 8, 1988	Mb= 5.50/ Ms= 5.70/ Mc= 5.00	19	123.44
85	1	Septiembre 14, 1988	Mb= 4.90/ Mc= 4.70	38	46.57
86	1	Marzo 10, 1989	Mb= 5.30/ Ms= 4.80/ Mc= 5.00	18	132.31
87	1	Abril 25, 1989	Mb= 6.30/ Ms= 6.90/ M= 6.50	19	336.27
88	1	Noviembre 2, 1989	Mc= 4.90	<5	48.49
89	1	Enero 29, 1990	Mb= 5.40/ Ms= 4.40/ M= 5.10	39	49.63
90	1	Abril 16, 1990			
91	1	Abril 17, 1990			
92	1	Abril 19, 1990			
93	1	Mayo 1, 1990			
94	1	Mayo 3, 1990			
95	1	Mayo 11, 1990	Mb= 5.30/ Ms= 4.90/ M= 5.30	12	177.50
96	2	Mayo 11, 1990	Mb= 5.30/ Ms= 4.90/ M= 5.30	12	177.50
97	3	Mayo 11, 1990	Mb= 5.30/ Ms= 4.90/ M= 5.30	12	177.50
98	1	Mayo 20, 1990			
99	1	Mayo 29, 1990			
100	1	Mayo 31, 1990	Mb= 5.80/ Ms= 5.90/ M= 5.50	16	169.11
101	1	Julio 4, 1990	Mb= 3.50/ Mc= 4.30	5	108.46
102	1	Agosto 22, 1990			
103	1	Octubre 2, 1990			
104	1	Octubre 20, 1990	Mc= 4.10	<5	724.51

Tabla 1.1 Características principales de los sismos utilizados

No	No. Evento	Sismo	Magnitud Richter	Profundidad Focal (Km)	Distancia del epicentro a la presa (Km)
105	1	Octubre 23, 1990			
106	2	Octubre 23, 1990			
107	1	Octubre 26, 1990			
108	1	Octubre 29, 1990	Mb= 5.00/ Mc= 5.00	<5	79.40
109	1	Enero 14, 1991	Mb= 5.30/ Ms= 5.00/ Mc= 5.10	25	39.50
110	1	Enero 15, 1991	Mc= 4.70	22	24.91
111	2	Enero 15, 1991	Mc= 4.70	22	24.91
112	3	Enero 15, 1991	Mc= 4.70	22	24.91
113	1	Enero 17, 1991	Mb= 4.70/ Mc= 4.80	23	31.08
114	2	Enero 17, 1991	Mb= 4.70/ Mc= 4.80	23	31.08
115	3	Enero 17, 1991	Mb= 4.70/ Mc= 4.80	23	31.08
116	4	Enero 17, 1991	Mb= 4.70/ Mc= 4.80	23	31.08
117	5	Enero 17, 1991	Mb= 4.70/ Mc= 4.80	23	31.08
118	1	Enero 30, 1991	Mc= 4.40	24	31.31
119	2	Enero 30, 1991	Mc= 4.40	24	31.31
120	3	Enero 30, 1991	Mc= 4.40	24	31.31
121	1	Abril 9, 1991			
122	1	Mayo 22, 1991	Mb= 5.00/ Ms= 4.60/ M= 5.10	<5	119.52
123	1	Octubre 29, 1991			
124	1	Diciembre 17, 1991			
125	1	Enero 12, 1992	Mc= 4.30	5	36.68
126	2	Enero 12, 1992	Mc= 4.30	<5	36.68
127	1	Febrero 12, 1992	Mb= 5.10/ Ms= 4.60/ Mc= 4.40	<5	125.24
128	2	Febrero 12, 1992	Mb= 5.10/ Ms= 4.60/ Mc= 4.40	<5	125.24
129	3	Febrero 12, 1992	Mb= 5.10/ Ms= 4.60/ Mc= 4.40	<5	71.19
130	1	Febrero 14, 1992	Mc= 4.70	12	35.97
131	2	Febrero 14, 1992	Mc= 4.70	<5	35.97
132	1	Febrero 29, 1992			
133	1	Marzo 7, 1992			
134	1	Marzo 15, 1992			
135	1	Abril 1, 1992	Mc= 4.50	18	122.00
136	1	Abril 1, 1992	Mb= 4.90/ Mc= 4.50	18	122.00
137	1	Abril 11, 1992	Mc= 4.30	5	39.00
138	2	Abril 11, 1992	Mc= 4.30	<5	39.00
139	1	Julio 24, 1992	Mc= 4.50	26	45.88

Tabla 1.1 Características principales de los sismos utilizados

No	No. Evento	Sismo	Magnitud Richter	Profundidad Focal (Km)	Distancia del epicentro a la presa (Km)
140	1	Julio 24, 1992	Mc= 4 50	10	45 88
141	1	Agosto 21, 1992		<5	
142	1	Agosto 27, 1992	Mb= 4 00/ Mc= 4 30	10	37 83
143	2	Agosto 27, 1992	Mb= 4 00/ Mc= 4 30	10	37 83
144	3	Agosto 27, 1992	Mb= 4 00/ Mc= 4 30	10	37 83
145	1	Septiembre 23, 1992	Mc= 4 40	<5	25 28
146	2	Septiembre 23, 1992	Mc= 4 40	5	25 28
147	3	Septiembre 23, 1992	Mc= 4 40	5	25 28
148	1	Octubre 10, 1992	Mc= 4 00	26	39 96
149	1	Marzo 11, 1993	Mb= 5 30/ Mc= 5 10	12	61 04
150	2	Marzo 11, 1993			
151	3	Marzo 11, 1993			
152	1	Marzo 31, 1993	Mb= 5 30/ Ms= 5 00/ Mc= 5 30	8	153 27
153	1	Agosto 20, 1993	Mb= 4 20/ Mc= 5 00	9	86 80
154	1	Agosto 26, 1993	Mb= 4 60/ Mc= 4 90	27	139 73
155	1	Agosto 27, 1993	Mb= 4 70/ Mc= 4 60	35	136 39
156	1	Mayo 16, 1994			
157	1	Mayo 23, 1994	M= 5 60	23	175 12
158	2	Mayo 23, 1994			
159	1	Agosto 22, 1994	Mc= 4 50	11	44 49
160	1	Octubre 18, 1994	Mb= 4 80/ Mc= 4 70	147	82 42
161	1	Noviembre 27, 1994	Mc= 4 50	80	83 20
162	1	Diciembre 10, 1994	Mc= 6 30	20	68 20
163	1	Diciembre 15, 1994	Mc= 4 00	92	75 27
164	1	Diciembre 31, 1994	Mc= 4 70	5	41 53
165	1	Marzo 20, 1995			
166	1	Abril 27, 1995			
167	1	Mayo 8, 1995	Mc= 3 40	<5	493 48
168	1	Junio 15, 1995			
169	1	Septiembre 14, 1995	Mw= 7 30/ Ms= 7 50	21	407 08
170	1	Septiembre 21, 1995	Mc= 4 60	83	77 38
171	1	Octubre 1, 1995			
172	1	Octubre 9, 1995	Mw= 7 90/ ME= 7 50/ Ms= 7 50	33	240 82
173	1	Octubre 12, 1995	Mc= 5 30	24	

Tabla 1.1 Características principales de los sismos utilizados

No	No. Evento	Sismo	Magnitud Richter	Profundidad Focal (Km)	Distancia del epicentro a la presa (Km)
174	1	Enero 25, 1996	Mb= 5.30/ Mc= 5.10	21	44.30
175	1	Febrero 11, 1996	Mc= 4.40	54	39.58
176	1	Julio 15, 1996	Mc= 6.00	20	125.26
177	1	Julio 18, 1996	Mc= 5.10	20	117.15
178	1	Diciembre 3, 1996	Mc= 4.20	14	90.81
179	1	Enero 11, 1997	Mb= 6.50/ Ms= 6.90	16	92.17
180	2	Enero 11, 1997	Mc= 4.70	16	90.63
181	1	Enero 12, 1997	Mc= 4.60	14	37.34
182	2	Enero 12, 1997	Mc= 4.30	8	45.39
183	1	Enero 16, 1997	Mc= 5.10	25	61.76
184	1	Enero 27, 1997	Mc= 4.90	23	52.44
185	1	Mayo 21, 1997	Mb= 4.30/ Mc= 4.60	16	70.60
186	1	Mayo 22, 1997	Mb= 5.90/ Ms= 6.00	59	61.84
187	1	Mayo 29, 1997	Mb= 3.80/ Mc= 4.40	27	63.80
188	1	Octubre 12, 1997	Mc= 4.50	63	66.66
189	1	Octubre 25, 1997	Mc= 4.30	16	80.14
190	1	Diciembre 22, 1997	Mc= 4.60	5	137.16
191	1	Febrero 27, 1998	Mc= 4.40	2	66.75
192	1	Marzo 13, 1998	Mc= 4.70	5	77.44
193	1	Abril 20, 1998	Mb= 5.90/ Mc= 5.00/ Ma= 5.5	66	113.89
194	1	Mayo 9, 1998	Mb= 4.80/ Ms= 4.70/ Mc= 4.80	18	109.16
195	1	Junio 27, 1998	Mc= 4.10	52	23.79
196	1	Enero 7, 1999	Mc= 4.10	8	17.04
197	1	Febrero 22, 1999	Mc= 4.10	9	16.38
198	1	Marzo 3, 1999			
199	1	Marzo 8, 1999			
200	1	Abril 2, 1999	Mc= 4.20	77	52.61
201	1	Abril 29, 1999	Mc= 4.00	9	5.56
202	1	Junio 15, 1999	Mb= 6.40/ Me= 7.00	69	506.13
203	1	Junio 21, 1999	Mb= 6.00/ Ms= 5.80/ Mc= 5.80	54	50.79
204	1	Junio 22, 1999	Mb= 4.90/ Mc= 4.40	28	37.95
205	1	Julio 5, 1999	Mb= 4.80	12	58.52
206	1	Diciembre 18, 1999	Mc= 3.90	208	85.29

Tabla 1.1 Características principales de los sismos utilizados

No	No. Evento	Sismo	Magnitud Richter	Profundidad Focal (Km)	Distancia del epicentro a la presa (Km)
207	1	Diciembre 29, 1999	Mb= 6.10/ Ms= 5.40/ Mc= 5.10	82	55.26
208	1	Febrero 15, 2000	Mc= 4.10	25	31.00
209	1	Abril 11, 2000	Mc= 5.10	10	49.00
210	1	Mayo 14, 2000	Mc= 4.70	7	98.00
211	1	Junio 30, 2000	Mc= 4.50	5	98.00
212	1	Julio 12, 2000	Mc= 3.90	72	48.00
213	1	Agosto 9, 2000	Mb= 6.10	16	50.00
214	2	Agosto 9, 2000	Mc= 4.60	66	41.00
215	3	Agosto 9, 2000	Mc= 4.30	6	36.00
216	4	Agosto 9, 2000	Mc= 4.60	9	37.00
217	5	Agosto 9, 2000	Mc= 4.60	7	51.00
218	6	Agosto 9, 2000	Mc= 4.30	24	39.00
219	1	Agosto 10, 2000	Mc= 4.50	7	46.00
220	1	Agosto 13, 2000	Mc= 4.40	9	64.00

Tabla 1.1 Características principales de los sismos utilizados

2.- MÉTODO DE ANÁLISIS

En este capítulo se presenta la aplicación de la *Transformada de Fourier* para determinar la respuesta de un sistema de un grado de libertad en el dominio de la frecuencia sometido a un sistema de fuerzas.

2.1 Transformada de *Fourier* :

Una función periódica puede ser descompuesta en sus componentes armónicas, mediante la transformación de la función al dominio de la frecuencia. Por lo que la suma de las componentes armónicas será la función periódica. (Figura 2.1)

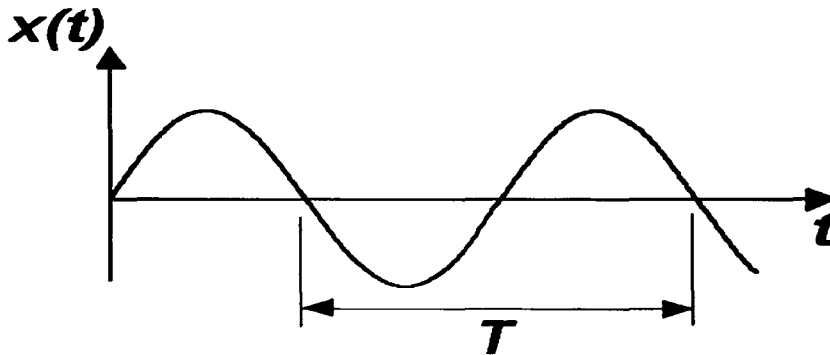


Figura 2.1 Función periódica arbitraria del tiempo

Si $\xi(t)$ es una función periódica del tiempo t , con periodo T , tal como se muestra en la figura 2.1, siempre es posible expresar $\xi(t)$ como una serie infinita de términos trigonométricos de la forma :

$$x(t) = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi t}{T} + a_2 \cos \frac{4\pi t}{T} + \dots + b_1 \text{sen} \frac{2\pi t}{T} + b_2 \text{sen} \frac{4\pi t}{T} + \dots$$

o, en notación más compacta

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \text{sen} \frac{2\pi kt}{T} \right) \dots \dots \dots (2.1)$$

donde las constantes a_0 , a_k y b_k son los coeficientes de *Fourier* dados por :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt$$

..... (2.2)

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \text{sen} \frac{2\pi kt}{T} dt$$

Las condiciones matemáticas dadas para la convergencia de la ecuación (2.1) son extremadamente generales y cubren prácticamente toda situación concebible de interés en ingeniería.

Supóngase que se ajusta la altura del eje t en la figura 2.1 de forma que el valor medio de $x(t)$ sea cero. Entonces el coeficiente a_0 será nulo. Y los coeficientes, a_k y b_k serán, en general, diferentes entre sí; sus valores se ilustran gráficamente en la figura 2.2.

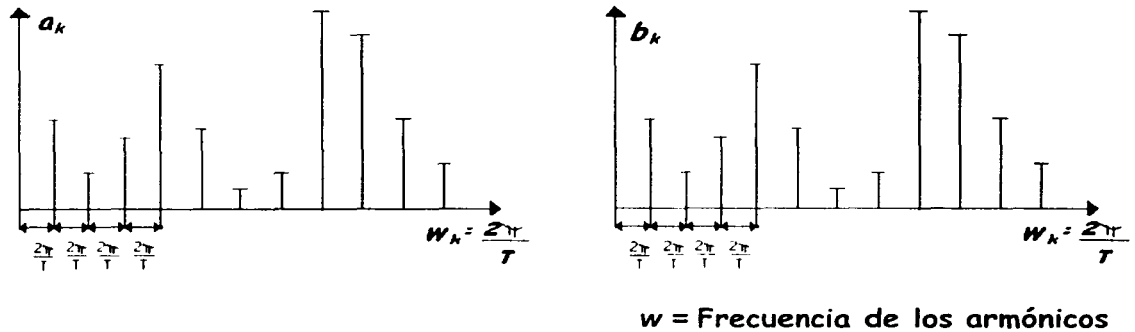


Figura 2.2 Representación gráfica de los coeficientes de Fourier

El eje horizontal de la figura 2.2 se ha elegido para representar la frecuencia y la situación del k -ésimo coeficiente es:

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{T} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

que es la frecuencia del k -ésimo armónico. El espacio entre armónicos adyacentes es:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Y veremos que cuanto mayor es el período T , más pequeño es el espacio $\Delta\omega$, y los coeficientes de *Fourier* están más estrechamente espaciados en la figura 2.2. En el límite de $T \rightarrow \infty$, llegarán a fundirse. Como en este caso $x(t)$ ya no representa un fenómeno periódico, no nos será posible descomponerla en componentes de frecuencia discreta. No obstante, ateniéndonos a ciertas condiciones, todavía podremos servirnos de la misma idea, si bien la serie de *Fourier* (ecuación 2.1) se convertirá en una integral de *Fourier* y los coeficientes de *Fourier* (ecuación 2.2) se convertirán en funciones continuas de la frecuencia, denominadas TRANSFORMADAS DE *FOURIER*.

Integral de *Fourier*

Sustituyendo (2.2) en (2.1) se obtiene para $a_0 = 0$,

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{2}{T} \int_{t_2}^{t_1} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \right\} \cos \frac{2\pi kt}{T} + \\ + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{2}{T} \int_{t_2}^{t_1} x(t) \text{sen} \frac{2\pi kt}{T} dt \right\} \text{sen} \frac{2\pi kt}{T}$$

A continuación sustituyendo el valor de $2\pi k/T$ obtenido de la ecuación (2.3) y el de $f = 1/T$ obtenido en la ecuación (2.4), tenemos

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{t_2}^{t_1} x(t) \cos \omega_k t dt \right\} \cos \omega_k t + \\ + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{t_2}^{t_1} x(t) \text{sen} \omega_k t dt \right\} \text{sen} \omega_k t$$

Si el período $T \rightarrow \infty$, entonces $\Delta\omega \rightarrow d\omega$ y el sumatorio se convierte en una integral con límites $\omega = 0$ y $\omega = \infty$. En tal caso

$$x(t) = \int_{\omega=0}^{\infty} \frac{d\omega}{\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt \right\} \cos \omega t + \\ + \int_{\omega=0}^{\infty} \frac{d\omega}{\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \text{sen } \omega t dt \right\} \text{sen } \omega t +$$

o poniendo

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega(t) dt \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \text{sen } \omega(t) dt$$

Los términos $A(\omega)$ y $B(\omega)$ definidos por la ecuación (2.5) son las componentes de la *Transformada de Fourier* de $x(t)$.

Este desarrollo no es en modo alguno riguroso, pero sirve para ilustrar el proceso lógico que lleva de una representación en serie de Fourier a una integral de Fourier. La teoría clásica del análisis de Fourier introduce a la condición :

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

que debe cumplirse para que la ecuación (2.5) sea cierta. La teoría clásica es válida solamente para funciones que tienden a cero cuando $t \rightarrow \infty$, de forma que se satisfaga la ecuación (2.6).

2.2 Espectro de Respuesta

Como se sabe el concepto más fundamental es el de la oscilación de una partícula en torno a un punto de equilibrio, debida a la acción combinada de inercia (por su masa), de disipación de energía (por su amortiguamiento), de almacenamiento de energía potencial y finalmente por las fuerzas excitadoras externas. Posteriormente este fenómeno se extiende al caso en que se tienen varias partículas o al caso extremo de un medio continuo, en el que este número es infinito. Así que en estos casos es importante conocer la historia de movimientos de cada una de las partículas, lo cual conduce a variaciones tanto en desplazamientos, como velocidades y aceleraciones, las que dependerán como es obvio de las fuerzas excitadoras y de sus características materiales (masa, amortiguamiento, etc.)

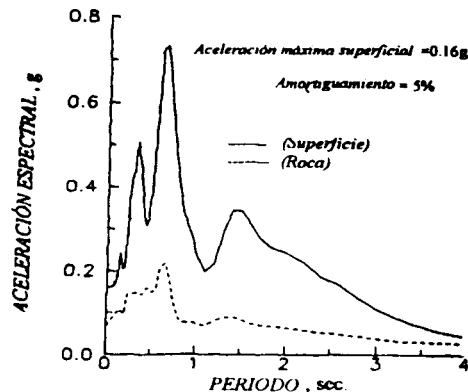


Figura 2.3 Espectro de respuesta

El espectro de respuesta es un gráfico de la máxima respuesta de un sistema de un grado de libertad en el que se hace variar su rigidez, pudiendo obtenerse con velocidades, desplazamientos y aceleraciones véase figura 2.3. La abscisa del espectro es la frecuencia de vibración (ó el período) del sistema y la ordenada la máxima respuesta.

2.3 Función de Transferencia

La *Función de Transferencia* $H(\omega)$ de un sistema en un estado estable, con características dinámicas es la respuesta del sistema a la entrada de una vibración, midiendo de manera aproximada la respuesta transitoria inicial y final para la alteración del mismo, en cualquier instante, hasta alcanzar nuevamente su equilibrio estático. Usualmente para considerar el resultado de la entrada de una vibración corta y cerrada en un sistema (teóricamente cero) en un intervalo de tiempo, la función de transferencia se elimina. Podemos representar la función de vibración mediante una función delta (δ) con la ecuación:

$$x(t) = I \delta(t)$$

Cuando I es una constante con parámetros constantes con la dimensión $(x) \times$ (tiempo). Para el caso cuando $x(t)$ representa una fuerza de vibración o impulso con una magnitud .

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) dt = I \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = I \text{ en (Fuerza) } \times \text{ (Tiempo)}$$

Esta terminología cubre el caso general cuando $x(t)$ representa algún parámetro de entrada, sea una fuerza o no, y define la función de transferencia del sistema respondiendo a la entrada de un impulso de manera que 1 tiene las dimensiones correctas. La excitación es una unidad de impulso cuando 1 es una unidad numérica. De tal manera que en respuesta a un impulso de entrada a un sistema que inicialmente se encuentra inactivo y repentinamente sufre una alteración que lo hace vibrar o moverse, hasta que gradualmente recobra su estado de equilibrio estático durante un periodo de tiempo. La respuesta a la unidad de impulso cuando $t = 0$ está representada por la función de transferencia $h(t)$ (Figura 2.4) Notese que cuando $h(t) = 0$ para $t < 0$ entonces $y(t) = 0$ es decir antes de que ocurra la vibración o el impulso.

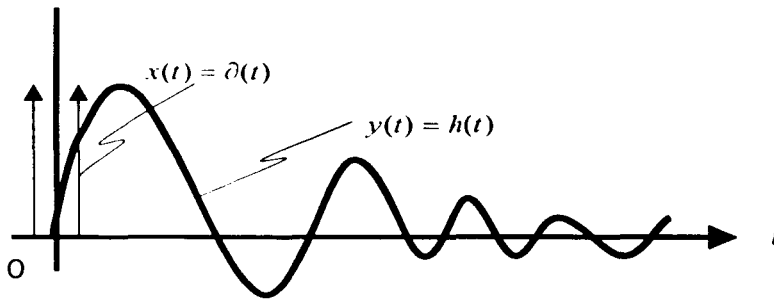


Figura 2.4 Función de Transferencia

2.4 Angulo de Fase:

El ángulo de fase ϕ , representa la distancia angular que está retrasada la respuesta respecto al desplazamiento. El ángulo de fase $\phi_{xy}(f)$ de el espectro cruzado entre la entrada y la salida de una vibración de un sistema, constituye el cambio a un sistema de frecuencias f . Por lo tanto el tiempo de retraso entre un sistema y una frecuencia f , puede darse por :

$$\xi = \phi_{xy}(f) / 2\pi f$$

2.5 Función de Coherencia:

El término $\gamma_{xy}^2(f)$ es llamado la función de coherencia. Cuando $\gamma_{xy}^2(f)=0$, para una frecuencia en particular, $x(t)$ y $y(t)$ son llamadas incoherentes, para dicha frecuencia en cuyo caso no existe una correlación. Si $x(t)$ y $y(t)$ son estáticamente independientes, cuando $\gamma_{xy}^2(f) \neq 0$ para todas las frecuencias. Cuando $\gamma_{xy}^2(f) = 1$, para toda f , entonces $x(t)$ y $y(t)$, se dice que son completamente coherentes.

2.6 Método de vibraciones aleatorias

Un proceso aleatorio $x(t)$ es estacionario si sus funciones de densidad de probabilidad son constantes para cualquier desplazamiento en la escala de tiempo. Llamaremos excitación al proceso aleatorio $x(t)$ que arriva a la estructura y respuesta $y(t)$ al proceso aleatorio $x(t)$ una vez que atravesó un medio continuo dado.

La función de autocorrelación de la excitación $x(t)$ describe la dependencia de un valor del proceso para un tiempo t_1 con otro valor del mismo proceso para otro tiempo t_2 , y es estacionario si esta función depende únicamente de $\tau = t_1 - t_2$, en cuyo caso se puede obtener mediante la ecuación 2.7.

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \dots\dots\dots (2.7)$$

De la función de autocorrelación se obtienen un valor real para cualquier τ de desfaseamiento del proceso, y presenta un máximo cuando su desplazamiento en el tiempo es nulo $\tau = 0$.

Para el cálculo de la función de autocorrelación de la respuesta $y(t)$ se utiliza una ecuación similar a la anterior.

$$R_v(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v(t)v(t+\tau)dt \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

De igual manera la ecuación 2.7 permite calcular la correlación cruzada entre la excitación y la respuesta, simplemente sustituyendo la excitación desplazada en el tiempo $x(t+\tau)$ por la respuesta desplazada en el mismo tiempo $x(t+\tau)$, lográndose la siguiente ecuación:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

De la función de autocorrelación se obtienen un valor real para cualquier τ de desfaseamiento entre los procesos y presenta un máximo para un desplazamiento en el tiempo τ . Con esta función se pueden determinar: el tiempo que la señal necesita para atravesar un medio continuo dado y las trayectorias de propagación de la señal, entre otras.

En un experimento el ruido producido por una bocina es captado por dos micrófonos (Figura 2.5). Se considera que el primero capta la señal tal cual es producida por la bocina, y el segundo la señal después de que atravesó un medio continuo. En adición, son colocadas dos superficies que refractan la señal, una lateral equidistante a los dos micrófonos y otra en la parte posterior del segundo micrófono a 0.51 m.

Las variantes del experimento consistieron en captar la señal con los dos micrófonos:

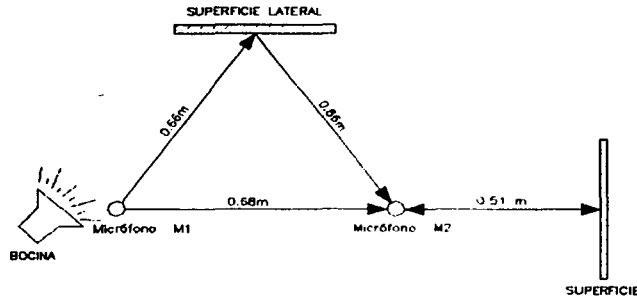


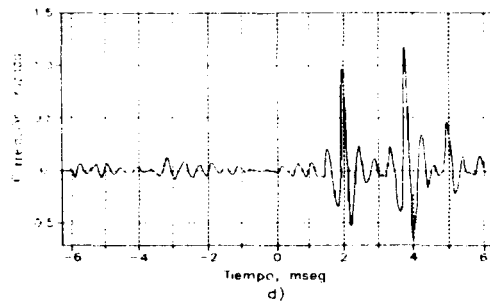
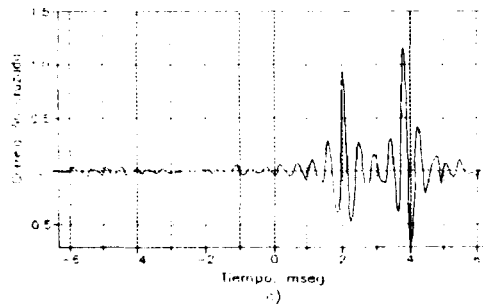
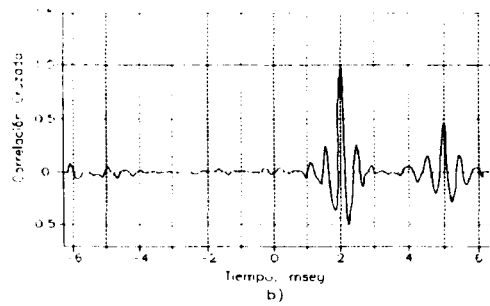
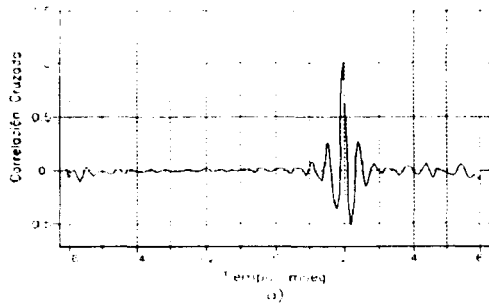
Figura 2.5 Experimento acústico

- sin superficies que refracten la señal,
- Con la superficie refractante lateral,
- Con la superficie refractante en la parte posterior del micrófono dos y
- Con ambas superficies refractantes.

Las correlaciones cruzadas entre los dos micrófonos, calculadas para las cuatro variantes del experimento acústico, son dibujadas en la Figura 2.6. En esta figura se observa que el tiempo que la señal necesita para pasar directamente de la posición del primer micrófono a la posición del segundo (0.68 m) es de $2 \mu s$, este está representado por la posición del pico en la función de correlación cruzada. Si existe una superficie reflejante, lateral y equidistante a los dos micrófonos, la señal tarda $3.9 \mu s$ en recorrer 1.32 m (Figura 2.6 b).

El tiempo que necesita la señal para pasar de la posición del primer micrófono a la del segundo, pasando por la superficie reflejante ubicada atrás del segundo micrófono (1.70 m) es de $5 \mu s$ (Figura 2.6c).

La superposición de las correlaciones cruzadas de las señales contemplando las superficies refractantes sobre la correlación cruzada sin superficies, representa la curva de correlación de la señal con diferentes rutas de propagación (Figura 2.6 d). Se dice entonces que la señal al atravesar el medio continuo entre los micrófonos se encuentra contaminada con ruido proveniente de la misma señal que sigue otra trayectoria de propagación.



Al aplicar la *Transformada de Fourier* a las funciones de autocorrelación de entrada $R_x(t)(t)$ y salida $R_y(t)(t)$ se obtiene como resultado la función de densidad espectral. Esta función describe la composición frecuencial del proceso aleatorio y se evalúa mediante la expresión

$$G_x(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = 4 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau \dots\dots\dots (2.10)$$

La función de densidad espectral cruzada de dos procesos aleatorios se obtiene aplicando la *Transformada de Fourier* a la función de correlación cruzada. El resultado así obtenido es un número complejo:

$$G_{xy}(f) = C_{xy}(f) - jQ_{xy}(f) \dots\dots\dots (2.11)$$

donde la parte real $C_{xy}(f)$ es llamada función de densidad co-espectral y la parte imaginaria $Q_{xy}(f)$ es llamada función de densidad de cuadratura.

Una vez evaluadas las funciones de densidad espectral y densidad espectral cruzada es posible determinar la función de transferencia, el ángulo de fase y la función de coherencia.

La función de transferencia calculada a partir de una entrada y la salida se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$H(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_x(f)} \dots\dots\dots (2.12)$$

Al expresar la función de densidad espectral cruzada en su notación polar nos permite evaluar el ángulo de fase:

$$G_{xy}(f) = |G_{xy}(f)| e^{j\theta_{xy}(f)} \quad \text{..... (2.13)}$$

donde los valores de la magnitud $|G_{xy}(f)|$ y el ángulo $|\theta_{xy}(f)|$ son calculados a partir de $C'_{xy}(f)$ y $Q_{xy}(f)$ mediante las siguientes ecuaciones

$$|G_{xy}(f)| = \sqrt{C'^2_{xy}(f) + Q^2_{xy}(f)} \quad \text{..... (2.14)}$$

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \left[\frac{Q_{xy}(f)}{C'_{xy}(f)} \right] \quad \text{..... (2.15)}$$

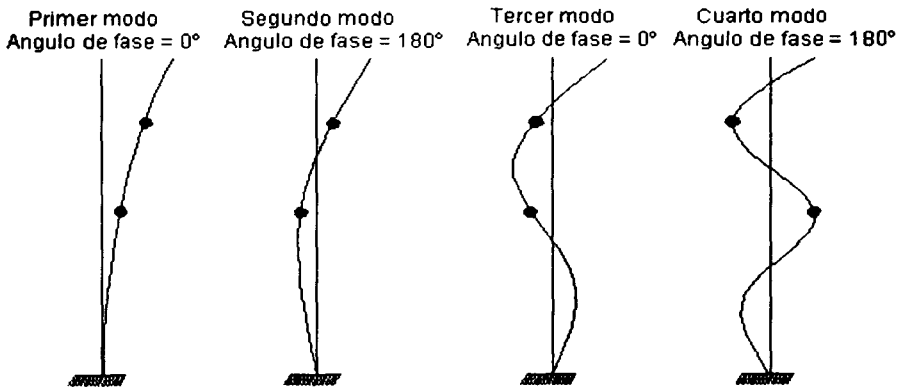


Figura 2.7 Primeros cuatro modos de vibrar de una estructura en cantiliver

donde la función $\theta_{xy}(f)$ es llamada ángulo de fase. Como ejemplo del significado físico del ángulo de fase, en la figura 2.7 se presentan los cuatro primeros modos de una estructura en cantiliver y se indica el valor del ángulo de fase para cada uno de ellos.

La función de coherencia, que indica la correlación entre la excitación y la respuesta, es obtenida mediante

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f)G_y(f)} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

Los valores de la función de coherencia deben ser menores que 1. Si los procesos de entrada y salida son estadísticamente independientes la función de coherencia es igual que 0.

En la figura 2.8 se presenta las gráficas del ángulo de fase y función de coherencia del experimento acústico (Figura 2.8). En la figura 2.8 a se observa que la forma de la curva tiene variaciones lineales entre los valores positivos y negativos del ángulo de fase con máximo igual a $\pm 180^\circ$, y curvas lineales e iguales a uno en las funciones de coherencia cuando la señal tiene una única ruta de propagación (Figura 2.8 a). En la figura 2.8 b se muestran las curvas de ángulos de fase y función de coherencia cuando existen diferentes rutas de propagación.

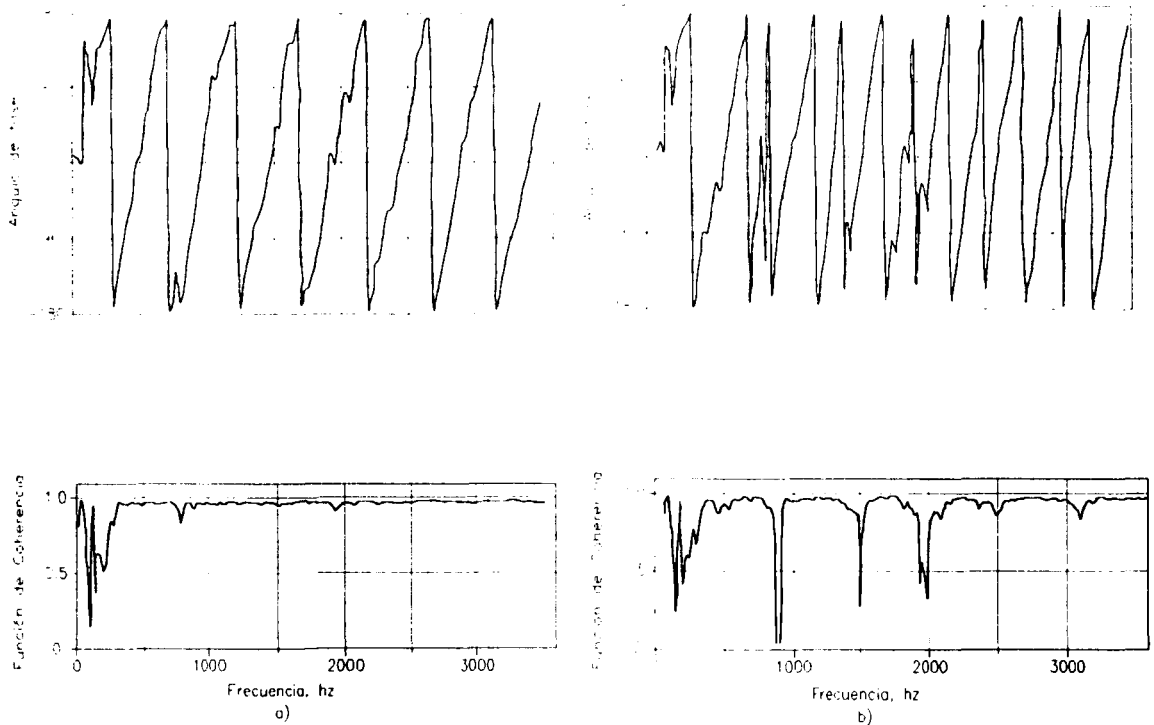


Figura 2.8 Ángulo de fase y función de coherencia del experimento acústico

En las estructuras térreas, es bien sabido que las ondas sísmicas arriban a todo lo largo de la cimentación. Para considerar tal efecto se pueden calcular las funciones de transferencia utilizando los sismos registros en los instrumentos instalados sobre las laderas.

Un proceso en el cual existen varios arribos de la señal a la estructura se representa en la figura 2.9.

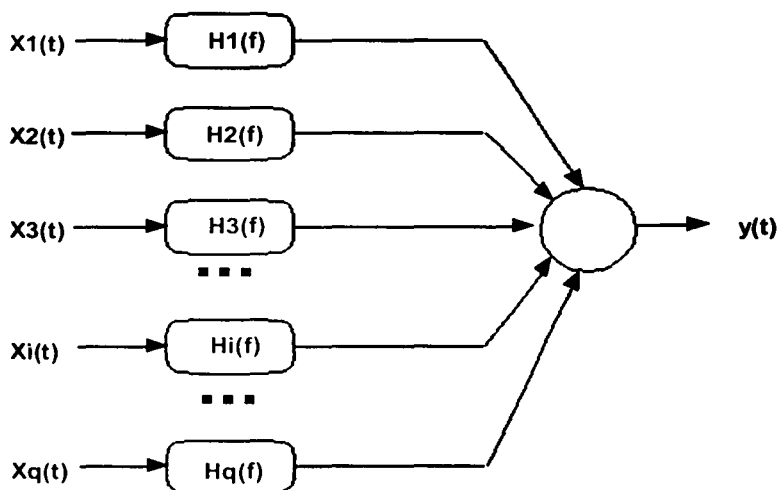


Figura 2.9 Proceso aleatorio de q arribos y una sola respuesta

En la mayoría de presas se cuenta con dos acelerógrafos instalados uno en cada margen, por lo que las funciones de transferencia para tal situación se pueden evaluar utilizando las siguientes expresiones.

$$H_1(f) = \frac{G_{1v}(f) \left[1 - \frac{G_{12}(f)G_{2v}(f)}{G_{22}(f)G_{1v}(f)} \right]}{G_{11}(f) [1 - \gamma_{12}^2(f)]} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$H_2(f) = \frac{G_{21}(f) \left[1 - \frac{G_{21}(f)G_{1y}(f)}{G_{11}(f)G_{2y}(f)} \right]}{G_{22}(f) [1 - \gamma_{12}^2(f)]} \dots\dots\dots (2.18)$$

Donde las funciones de densidad espectral, $G_{1y}, G_{2y}, G_{11}, G_{22}, G_{12}$ y G_{21} son evaluadas con las ecuaciones 2.10 y 2.11, y la función de coherencia γ_{12}^2 con la ecuación 2.16.

3.- COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA CORTINA

Durante un sismo, la base de las construcciones sigue casi fielmente el movimiento del terreno sobre el que se apoya. Sin embargo, debido a la inercia (propiedad intrínseca de todo cuerpo que trata de mantener su estado de reposo o movimiento) y a la flexibilidad de la construcción, es más fácil para las partes superiores mantener su estado de reposo inicial. Esto ocasiona que mientras la base es obligada a seguir la oscilación de terreno, las partes superiores obedecen más a la inercia que al movimiento de los niveles inferiores. Así, para que estos desplazamientos relativos ocurran, la estructura debe deformarse para mantener su integridad. Resulta interesante observar que la ocurrencia de un temblor impone a la estructura deformaciones, no fuerzas. Y una vez terminado el movimiento en la base la parte superior sigue deformándose.

3.1 Efecto de los sismos sobre la cortina

La respuesta sísmica de una estructura no solo depende de la edificación sino también del tipo de movimiento de su base; este último depende principalmente del carácter del temblor, de la distancia epicentro-estructura y del suelo sobre el que se apoya la construcción.

A partir de los daños observados en presas y terraplenes, inducidos por sismo, se puede inferir que los principales mecanismos de falla son: deslizamiento y distorsión

por cortante, agrietamiento longitudinal y transversal, ruptura de conductos subterráneos, corte por desplazamiento de fallas geológicas, oscilaciones del embalse de período largo y oleaje generado por deslizamiento en el vaso y por último asentamiento de la cimentación.

La alta incidencia de deslizamiento o distorsión por cortante durante temblores, parece ser un apoyo en la práctica tradicional de hacer énfasis en el diseño contra falla por deslizamiento, aunque no se debe desechar la probabilidad de ocurrencia de otros modos de falla, como los que se comentarán a continuación.

La experiencia ha demostrado que la mayor parte del agrietamiento longitudinal y transversal de terraplenes durante temblores, se puede atribuir a asentamientos, que a su vez son función de la distorsión por cortante del terraplén (deformaciones angulares) en presas bien construidas. Por tanto los modos de falla por agrietamiento no deben considerarse como modos de falla independientes, sino más bien como consecuencia del modo de deformación por cortante.

Los casos reales muestran que los efectos de deformación por cortante de un terraplén sometido a un sismo pueden variar desde una ligera distorsión del talud hasta el deslizamiento de gran parte del terraplén.

Se puede esperar que presas de tierra modernas, bien diseñadas, desplantadas sobre cimentaciones densas, no presenten deslizamientos masivos durante temblores. Sin embargo, aún las presas bien diseñadas pueden sufrir distorsiones provocadas por un fuerte temblor. La principal consecuencia de esta distorsión es la

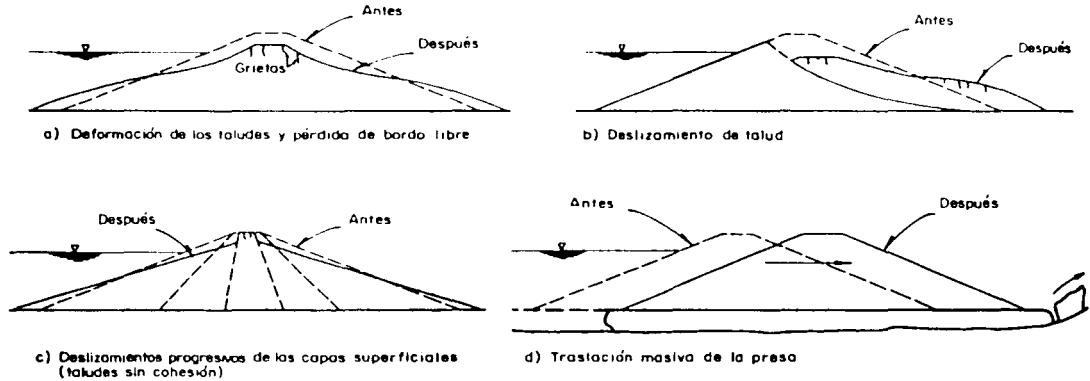


Figura 3.1 Varios tipos de daños inducidos por deformaciones por cortante.

pérdida de bordo libre o asentamiento de la corona; otras, son el desarrollo de grietas en zonas del terraplén donde el patrón de distorsión induce deformaciones por extensión, y la presión confinante es relativamente baja (Figura 3.1). Además, la altura de la sección transversal máxima en la mayoría de las presas varía a lo largo del eje del terraplén, se pueden presentar asentamientos diferenciales en la corona, los que a su vez inducen extensión longitudinal y grietas en algunos tramos de la corona (Figura 3.2) principalmente en los extremos.

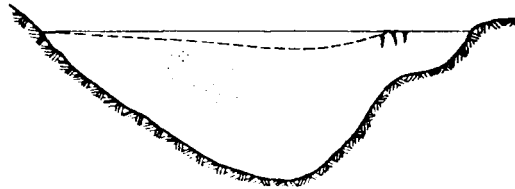


Figura 3.2 Agrietamiento transversal inducido por asentamientos diferenciales.

La intensidad de la distorsión por cortante y la magnitud de la consecuente pérdida de bordo libre y agrietamiento dependen de las características de la presa y del temblor, pudiendo alcanzar proporciones catastróficas bajo sismos muy fuertes.

En la Presa **José Ma. Morelos** se han podido registrar un total de 220 sismos de magnitud mayor a 2 grados Richter (Tabla 1.1 y Figura 1.6). Los registros de los sismos utilizados en este estudio corresponden a los eventos sísmicos indicados en la tabla 3.1 y los espectros de respuesta de estos sismos fueron graficados en la figura 3.6. Así mismo en la tabla 3.1 se agrupa la aceleración máxima, registradas en diferentes puntos de la presa, provocadas por los sismos desarrollados en la zona de subducción y de fallamiento normal.

Los máximos niveles de aceleración en la componente transversal se presentan en la corona de la cortina y corresponden a los sismos del 11 de Enero de 1997 (624.00 cm/s^2), el 22 de Mayo de 1997 (496.4 cm/s^2), el 9 de Agosto de 2000 (262.00 cm/s^2), del 14 Marzo de 1979 (371.20 cm/s^2) y del 11 de Octubre de 1975 (342.83 cm/s^2). Para los demás sismos los niveles de aceleración son aproximados o menores a los 200.00 cm/s^2 .

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vertical	Longitudinal	Transversal
007	04/01/75	54.55	Mb= 4.90	VILB VILC	-6.22 9.92	9.97 11.27	10.82 22.10
008	11/10/75	44.51	Mo=5.50	VILB VILC VILD	-80.10 85.28 0	-108.7 115.69 -32.02	-81.97 342.83 -70.56
009	15/11/75	26.82	Mb=5.90/ Ms=5.90	VILB VILC VILD	83.69 73.30 -41.32	-59.32 -72.91 -28.32	-84.89 209.30 39.37
010	14/03/79	113.68	Mb=7.00	VILB VILC VILD	-124.30 -156.00 17.97	50.42 -184.40 -14.66	-132.50 371.20 ****
013	25/10/81	22.62	Mb=4.50	VILB VILC	-18.23 28.54	17.56 -11.80	-24.55 49.21
017	11/11/81	121.38		VILB VILC	16.75 0	9.90 -6.64	-17.57 12.08
022	28/05/85	134.17	Mb=5.20	VILB VILC	-6.76 -18.32	-2.92 -12.59	9.16 -10.12
024	02/06/85			VILB VILC	-15.31 8.85	-6.36 6.39	-8.91 20.62
026	19/06/85	70.42	Mb=4.40	VILC VILD	10.24 5.57	-8.23 -6.59	-20.93 -10.20
029	19/09/85	81.95	Mb=6.80/ Ms=8.10/ Mc=8.10	VILC VILE	-306.00 58.40	-297.00 122.54	-125.10 19.74
032	21/09/85	76.94	Mb=6.30/ Ms=7.60/ Mc=7.50	VILC VILE	115.10 -6.23	62.31 41.10	195.57 30.41
035	21/09/85			VILB VILC	-8.73 -7.63	4.12 -4.50	-4.56 14.00

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vértical	Longitudinal	Transversal
043	24/09/85	83.65	Mb=4.50	VILC	19.10	16.33	35.60
				VILD	10.94	5.01	-11.54
				VILI	9.37	-11.42	-12.11
044	24/09/85	131.41		VILB	-13.59	6.13	11.96
				VILC	-12.36	-9.26	34.62
				VILD	12.87	4.91	-15.62
045	24/09/85	63.68	Mb=4.50	VILB	11.63	3.84	-10.41
				VILC	-18.54	8.96	-30.16
				VILD	-12.61	-4.30	-15.18
051	27/09/85	30.70	Mb=4.70	VILC	-16.56	-8.88	-28.63
				VILI	-11.21	-4.03	-9.62
055	29/10/85	64.66	Mb=5.60/ Ms=5.40/ Mc=5.10	VILC	-50.26	33.20	142.06
				VILI	-9.98	0	-18.33
061	12/01/86	31.85	Mb=5.10/ Mc=4.70	VILC	14.92	-8.20	-82.53
				VILI	10.90	-4.99	-10.11
069	30/04/86	93.79	Mb=6.20/ Ms=7.00/ Mc=6.40	VILB	-43.42	-22.72	-32.69
				VILC	42.56	34.01	132.95
				VILD	-25.71	19.47	-24.75
				VILI	16.67	-13.88	-17.16
072	05/05/86	69.85	Mb=5.60/ Ms=5.50/ Mc=5.60	VILC	27.97	-26.94	-60.52
				VILI	20.53	8.53	-16.52
073	19/06/86	69.63	Mb=5.20/ Mc=4.80	VILI	-24.65	29.63	28.42
				VILB	19.89	-9.62	17.73
074	04/11/86	27.72	Mb=4.80/ Mc=4.80	VILC	-19.59	-12.81	46.33
				VILI	-19.66	-11.34	13.19
077	24/12/86	63.80		VILC	18.72	-15.99	-40.51
				VILD	20.57	6.18	12.67
				VILI	-15.17	-5.70	24.43

Tabla 3.1 Características principales de los sismos más importantes

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vertical	Longitudinal	Transversal
084	08/02/88	123.44	Mb=5.50/ Ms=5.70/ Mc=5.00	VILC	13.5	-10.05	22.53
				VILI	10.22	-3.63	12.34
				VILT	11.93	-9.21	-19.22
086	10/03/89	132.31	Mb=5.30/ Ms=4.80/ Mc=5.00	VILC	-10.05	4.79	-13.88
				VILH	6.7	-5.74	-9.57
087	25/04/89	336.27	Mb=6.30/ Ms=6.90/ M=6.50	VILC	-5.26	-2.87	-12.44
				VILG	-4.79	-2.87	-10.05
088	02/11/89	48.49	Mc=4.90	VILC	5.26	4.31	13.40
				VILG	-9.57	-6.70	-9.57
089	29/01/90	49.63	Mb=5.40/ Mc=4.40/ M=5.10	VILF	22.49	-18.18	21.05
				VILG	-22.97	-26.80	36.37
				VILT	19.62	-21.05	26.80
100	31/05/90	169.11	Mb=5.80/ Ms=5.90/ M=5.50	VID1	-18.18	-9.57	-18.66
				VID2	29.19	16.27	-30.63
				VILC	27.75	12.44	-29.67
				VILF	-17.23	-10.05	-17.23
				VILG	-21.05	-7.66	26.80
				VILI	8.37	2.87	-5.26
				VILT	23.45	10.05	-22.97
101	04/07/90	108.46	Mb=3.50/ Mc=4.30	VILC	7.66	-5.74	9.57
				VILG	-7.66	3.83	-9.57
				VILT	5.74	4.31	8.13
103	02/10/90			VID2	4.79	7.66	3.35
				VILC	-15.31	5.74	-15.31
108	29/10/90	79.40	Mb=5.00/ Mc=5.00	VID1	3.83	9.57	4.79
				VID2	5.26	4.79	5.74
				VILC	-5.74	9.57	9.57
				VILH	-5.74	-3.83	7.66
				VILT	3.36	8.61	-7.18

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vertical	Longitudinal	Transversal
111	15/01/91	24.91	Mc=4.70	VILC	7.66	-7.66	7.66
				VILD1	4.31	5.74	7.18
				VILD2	7.18	5.74	8.61
				VILH	5.74	-4.79	7.66
				VILT	6.22	-5.25	-9.09
112	15/01/91	24.91	Mc=4.70	VID1	4.31	5.74	7.18
				VID2	7.18	5.74	8.61
				VILC	-7.66	-7.66	-15.31
				VILH	5.74	-4.79	7.66
				VILT	6.22	-5.26	-9.09
115	17/01/91	31.08	Mb=4.70/ Mc=4.80	VID1	2.87	3.83	3.35
				VID2	3.83	3.35	3.35
				VILC	6.70	2.87	9.57
				VILT	8.13	6.22	13.88
116	17/01/91	31.08	Mb=4.70/ Mc=4.80	VILC	12.44	8.61	26.80
				VILD1	6.22	-6.22	8.13
				VILD2	-11.48	-9.57	11.01
117	17/01/91	31.08	Mb=4.70/ Mc=4.80	VILF	-8.61	7.66	-21.05
				VILG	5.74	-6.70	8.61
119	30/01/91	31.31	Mc=4.40	VILH	-5.74	-4.79	8.61
				VILT	-6.22	8.13	-7.18
120	30/01/91	31.31	Mc=4.40	VID1	3.35	8.13	-4.79
				VID2	5.74	5.26	-6.70
				VILC	-7.66	7.66	-11.48
121	09/04/91			VID1	2.87	5.74	3.35
				VID2	4.79	5.26	4.79
				VILC	-10.53	-3.83	-15.31
122	22/05/91	119.52	Mb=5.00/ MS=4.60/ M=5.10	VID1	-2.87	2.87	4.79
				VID2	-6.74	-5.74	6.22
				VILC	7.66	3.83	-8.61
				VILT	5.26	2.39	-6.22

Tabla 3.1 Características principales de los sismos más importantes

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vertical	Longitudinal	Transversal
127	12/02/92	125.24	Mb=5.10/ Ms=4.60/ Mc=4.40	VILB	17.23	9.57	-17.23
				VILD	9.57	4.79	7.66
				VILI	11.25	5.26	10.53
				VILT	14.83	10.05	-19.62
130	14/02/92	35.97	Mc=4.20	VILB	12.44	-5.74	9.57
				VILC	-5.74	-7.66	8.61
				VILD	8.61	5.74	6.70
				VILI	-6.46	3.59	-8.61
				VILT	5.26	3.83	-6.70
				VII6	8.61	-5.74	6.22
131	14/02/92	35.97	Mc=4.70	VILC	9.57	-8.61	22.97
				VII6	-18.18	11.96	11.96
				VILT	-6.70	6.22	14.83
132	01/04/92	122.00	Mc=4.50	VILC	-8.61	4.79	-14.36
				VILT	7.18	-3.83	-9.09
139	24/07/92	45.88	Mc=4.50	VILC	-5.74	3.83	-14.36
				VILI	5.74	1.67	-4.07
				VILT	-4.79	3.83	9.57
142	27/08/92	37.83	Mb=4.00/ Mc=4.30	VILI	12.92	-5.50	8.61
				VILT	10.05	8.61	23.45
146	23/09/92	25.28	Mc=4.40	VILI	6.70	-5.98	-10.05
				VILT	18.66	-17.23	-19.62
148	10/10/92	39.96	Mc=4.00	VILC	7.66	5.74	-13.40
				VILT	5.74	7.31	-9.57
149	11/03/93	61.04	Mb=5.30/ Mc=5.10	VILB	-27.75	-29.67	24.88
				VILE	5.91	-6.21	-7.64
				VILF	23.93	-16.27	29.67
				VILI	29.19	-17.71	32.54
				VILT	-30.63	-24.88	49.29
152	31/03/93	153.27	Mb=5.30/ Ms=5.00/ Mc=5.30	VILB	4.79	2.87	3.83
				VILF	2.87	1.91	-3.83
				VILT	3.83	2.39	-6.22

Tabla 3.1 Características principales de los sismos más importantes

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vertical	Longitudinal	Transversal
154	26/08/93	139.73	Mb=4.60/ Mc=4.90	VILB	-4.79	3.83	5.74
				VILF	3.83	-2.87	-5.74
				VILT	4.79	-3.83	-5.22
155	27/08/93	136.39	Mb=4.70/ Mc=4.80	VILB	3.83	3.83	-6.70
				VILF	3.83	-2.87	6.70
				VILT	-6.22	4.79	-7.18
157	23/05/94	175.12	M=5.60/ Mw=5.60/ Mb=5.80	VILB	-6.93	-5.11	5.97
				VILF	-7.66	4.90	-6.68
				VILP	7.78	6.13	9.34
159	22/08/94	44.49	Mc=4.50	VILB	5.74	3.83	-7.66
				VILF	3.83	-5.74	-6.70
				VILP	5.34	4.70	6.04
160	18/10/94	82.42	Mb=4.80/ Mc=4.70	VILB	5.74	9.57	-5.74
				VILF	-3.83	-6.70	-4.79
162	10/12/94	68.20	Mc=6.30	VILB	-52.64	-47.85	58.38
				VILD	23.92	47.92	33.22
				VILF	-48.81	45.94	-59.34
				VILI	-45.94	27.28	38.28
				VILP	39.10	61.14	79.81
				VILT	44.14	52.10	88.14
164	31/12/94	41.53	Mc=4.70	VILB	10.53	-5.74	-8.61
				VILD	17.23	4.21	-3.92
				VILF	5.74	4.79	5.74
				VILI	9.57	-2.87	-5.74
				VILP	-6.10	9.05	-8.29
				VILT	6.25	5.76	9.35
165	20/03/95			VILB	12.44	-8.61	-14.36
				VILD	-24.17	9.39	-14.61
				VILF	12.44	-10.53	-18.18
				VILP	17.33	11.03	-13.38
				VILT	-22.03	-11.02	22.03
166	27/04/95			VILB	21.05	14.36	-19.14
				VILD	-12.59	-6.61	11.30
				VILF	16.49	-10.47	16.16
				VILP	-14.83	13.54	-29.70
				VILT	-18.08	-23.48	31.56

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vertical	Longitudinal	Transversal
168	15/06/95			VILF	2.87	-3.83	4.79
				VILI	5.74	-2.87	8.13
169	14/09/95	407.80	Mw=7.30/ Ms=7.50	VILP	5.74	2.02	3.13
				VILT	-2.39	1.44	6.70
170	21/09/95	77.38	Mc=4.60	VILP	2.90	3.96	4.12
				VILT	-2.87	2.87	5.26
171	01/10/95			VILB	6.70	-2.87	3.83
				VILI	-6.70	-2.87	-3.35
172	09/10/95	240.82	Mw=7.90/ ME=7.50/ Ms=7.60	VILB	10.53	5.74	-12.44
				VILD	-6.59	3.91	4.44
				VILF	-7.66	-5.74	12.44
				VILI	3.35	2.87	-5.26
				VILP	16.21	-10.01	-16.57
				VILT	12.92	6.22	19.62
173	12/10/95			VILB	3.83	-2.87	-4.79
				VILF	-3.83	-3.83	-5.74
				VILP	9.87	3.84	-6.63
174	25/01/96	44.30	Mc=5.10	VILB	84.22	-58.38	-90.92
				VILD	33.77	33.77	37.99
				VILE	62.05	-16.27	28.71
				VILF	-14.42	-5.74	11.48
				VILI	-7.66	-40.57	-66.99
				VILP	-95.26	49.24	112.08
				VILT	-78.56	71.84	124.57
175	11/02/96	39.58	Mc=4.40	VILB	-7.66	-8.61	-6.70
				VILD	-3.10	-3.10	-3.06
				VILF	3.83	-4.79	-5.74
				VILI	6.22	-3.35	-5.26
				VILP	-6.66	4.85	8.62
				VILT	7.19	-6.70	7.19

Tabla 3.1 Características principales de los sismos más importantes

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vertical	Longitudinal	Transversal
176	15/07/96	125.26	Mc=6.00	VILB	27.03	-14.29	28.86
				VILD	-11.49	-6.82	-9.81
				VILF	-20.10	-17.23	-27.75
				VILI	14.36	-6.70	14.83
				VILP	-40.88	21.77	-27.75
				VILT	32.33	-14.27	-43.42
177	18/07/96	117.15	Mc=5.10	VILB	8.44	-5.79	8.78
				VILF	5.78	5.86	-9.77
				VILI	7.66	5.26	-6.22
				VILP	11.24	-12.32	-13.80
				VILT	-9.45	-5.86	-14.55
179	11/01/97	92.17	Mc=6.50	VILB	94.27	94.27	94.27
				VILC	-169.30	186.05	-624.50
				VILD	74.89	74.89	74.89
				VILE	55.10	55.10	55.10
				VILF	139.60	-136.80	144.80
				VILI	70.02	70.02	70.02
181	12/01/97	37.34	Mc=4.60	VILB	4.34	4.76	4.56
				VILC	-4.01	4.88	14.66
				VILD	-10.97	-3.11	3.40
				VILF	-3.65	4.58	4.36
				VILI	7.71	-2.08	4.50
182	12/01/97	45.39	Mc=4.30	VILB	-5.13	3.64	-5.03
				VILD	8.36	2.79	-5.14
183	16/01/97	61.76	Mc=5.10	VILB	23.97	16.34	16.28
				VILC	19.15	-15.75	49.98
				VILD	34.07	10.68	-12.04
				VILF	20.17	19.40	18.21
				VILI	10.60	-5.83	9.73
184	27/01/97	52.44	Mc=4.90	VILB	4.67	6.73	7.49
				VILC	8.58	-7.5	15.89
				VILD	7.41	-1.97	-4.03
				VILF	6.63	-3.84	4.85
				VILT	8.62	-6.55	12.45

Tabla 3.1 Características principales de los sismos más importantes

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vertical	Longitudinal	Transversal
185	21/05/97	70.60	Mc=4.60	VILB	9.05	-7.43	7.73
				VILC	14.74	10.38	22.01
				VILD	4.88	-2.87	4.96
				VILE	2.67	2.22	-3.59
				VILF	-7.72	8.52	-8.73
				VILI	-6.08	1.99	-6.88
				VILT	-9.44	-8.72	17.27
186	22/05/97	61.84	Mb=5.90	VILB	129.33	-91.49	-96.76
				VILC	-145.60	-149.50	-496.4
				VILD	72.82	39.55	-39.15
				VILE	-22.12	-34.51	25.53
				VILF	102.22	-59.31	81.94
				VILI	80.86	38.72	-66.99
				VILT	96.28	81.40	-191.6
187	29/05/97	63.80	Mc=4.40	VILB	-8.44	-5.07	-6.56
				VILC	6.00	6.12	-22.86
				VILD	-7.11	-1.98	4.32
				VILE	-1.55	-2.68	1.67
				VILF	4.63	-5.90	6.90
				VILI	-6.42	-2.30	-4.81
				VILT	-4.85	-4.56	-9.92
188	12/10/97	66.66	Mc=4.50	VILB	-7.66	-4.98	-8.62
				VILC	11.08	-6.79	-22.11
				VILD	-4.60	2.40	4.86
				VILF	-3.37	2.95	3.40
				VILI	-5.60	-1.95	-5.28
				VILT	-8.93	5.37	-16.54
				190	22/12/97	137.16	Mc=4.60
VILF	-4.20	-3.11	-5.44				
191	27/02/98	66.75	Mc=4.40	VILB	5.72	-2.87	3.93
				VILC	9.06	-5.39	13.68
				VILF	5.95	-3.29	5.65
				VILI	-3.17	2.41	-5.14
192	13/03/98	77.44	Mc=4.70	VILC	2.86	-1.65	14.09
				VILF	14.99	14.99	14.99

Tabla 3.1 Características principales de los sismos más importantes

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vertical	Longitudinal	Transversal
193	20/04/98	113.89	Mc=5.00	VILB	-11.52	13.45	11.78
				VILC	19.11	-13.83	-27.19
				VILD	-7.41	4.30	-5.72
				VILE	2.92	-2.75	3.13
				VILF	-12.11	-11.21	11.52
				VILI	-6.85	-5.07	-9.25
194	09/05/98	109.16	Mc=4.80	VILB	9.53	-5.17	-9.36
				VILC	12.22	-5.41	17.16
				VILD	4.39	-2.25	4.56
				VILE	-1.95	2.60	-1.84
				VILF	7.04	-5.76	-8.93
				VILI	-6.59	-3.30	-6.17
195	27/06/98	23.79	Mc=4.10	VILC	-12.05	12.15	24.13
				VILE	4.82	3.17	-2.84
				VILT	28.74	9.10	-16.81
197	22/02/99	16.38	Mc=4.10	VILC	3.35	-3.83	9.96
				VILE	1.03	1.92	2.85
				VILI	-6.69	-1.29	5.48
200	02/04/99	52.61	Mc=4.20	VILC	-4.30	4.31	8.62
				VILT	-3.48	1.77	5.74
201	29/04/99	5.56	Mc=4.00	VILC	5.27	2.87	-11.83
				VILF	-3.81	-2.43	5.74
				VILI	-4.87	2.07	5.90
				VILT	-2.73	3.80	9.25
202	15/06/99	506.13	Mb=6.40/ Me=7.00	VILB	-3.67	-1.88	-5.26
				VILC	8.33	2.68	11.68
				VILT	6.59	-2.40	9.58
203	21/06/99	50.79	Mb=6.00	VILB	-80.94	-74.52	82.39
				VILC	-108.50	-85.85	-147.00
				VILD	-46.31	42.17	-48.07
				VILE	22.77	-29.55	30.34
				VILF	88.14	-63.21	-80.09
				VILI	-50.77	34.01	52.69
				VILT	-88.53	79.52	-116.40

Tabla 3.1 Características principales de los sismos más importantes

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vertical	Longitudinal	Transversal
204	22/06/99	37.95	Mb=4.90	VILB	14.51	-12.04	-14.24
				VILC	16.85	10.54	28.23
				VILD	-11.02	-6.65	8.03
				VILE	3.11	-4.23	-4.24
				VILF	-6.71	-8.28	-12.12
				VILI	11.50	-9.69	9.58
				VILT	14.78	-11.56	18.20
205	05/07/99	58.52	Mb=4.80	VILB	-7.67	-4.67	-5.06
				VILT	6.33	-5.58	-8.46
206	18/12/99	85.29	Mc=3.90	VILC	4.09	5.19	-12.27
				VILF	1.93	-3.83	-4.79
				VILI	-5.94	2.32	6.69
207	29/12/99	55.26	Me=5.90	VILC	56.69	45.98	-110.70
				VILF	43.12	28.74	28.74
				VILI	-34.01	24.91	24.91
209	11/04/00	49.00	Mc= 5.10	VILB	22.98	13.89	13.78
				VILC	27.00	-14.36	34.49
				VILF	-16.63	14.36	12.45
				VILI	21.5	-6.35	12.03
				VILT	15.49	-14.83	28.97
210	14/05/00	98.00	Mc= 4.70	VILB	3.86	-2.20	-4.08
				VILC	-4.50	3.36	-8.00
211	30/06/00	98.00	Mc= 4.70	VILB	-5.70	3.13	-6.50
				VILC	-7.74	6.31	-16.43
				VILD	3.54	2.64	5.35
213	09/08/00	50.00	Mb= 6.10	VILB	-95.80	75.20	-93.39
				VILC	-163.30	110.18	262.00
				VILD	-146.70	-69.91	85.44
				VILF	-107.20	-80.47	-91.00
				VILI	-96.76	-50.81	85.44
				VILT	131.12	105.91	-126.80

Tabla 3.1 Características principales de los sismos más importantes

No.	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
					Vertical	Longitudinal	Transversal
214	09/08/00	41.00	Mc=4.60	VILC	10.53	6.76	15.80
				VILD	9.30	2.88	5.36
				VILF	7.66	6.71	-6.70
				VILI	-7.67	3.39	-4.96
				VILT	-8.83	-6.61	11.15
215	09/0800	36.00	Mc=4.30	VILC	-2.90	3.91	-4.76
				VILD	-10.89	-4.12	-6.17
				VILF	-6.75	-9.58	8.62
				VILI	-6.79	3.22	-5.56
216	09/08/00	37.00	Mc=4.60	VILC	-10.53	-8.58	20.60
				VILD	7.37	2.55	-4.24
				VILI	-5.82	-2.07	-5.03
219	10/08/00	46.00	Mc= 4.50	VILC	-8.14	-5.27	-10.06
				VILD	8.65	-3.24	-4.86
				VILI	6.63	-2.47	5.49

Tabla 3.1 Características principales de los sismos más importantes

Es notorio que los sismos de magnitud mayor de 5.5 son los que producen niveles de aceleraciones mayores a los 100 gals. No es clara la relación de los niveles de aceleración con la distancia epicentral, la profundidad focal y la magnitud, ya que el sismo más intenso el del 19 de Septiembre de 1985 (magnitud= 6.80 en Grados Richter en la base, distancia epicentral= 81.95 Km y prof. focal=<5 Km) generó sólo la mitad de la aceleración que el sismo del 11 de Enero de 1997 (Magnitud= 6.50 en Grados Richter en la base, distancia epicentral= 92.17 Km y prof. focal= 16 Km), por lo que el efecto de la directividad es muy importante en el comportamiento de la cortina.

En general las aceleraciones transversales son ligeramente mayores a las aceleraciones de las otras componentes, pero en particular el sismo del 19 de Septiembre de 1985 produjo niveles de aceleración mayores en la componente vertical que en las otras componentes. También en la mayoría de los casos el nivel de aceleración registrado en la corona es del orden de 20 veces mayor al correspondiente a la base de la cortina.

La instrumentación de presas ha revelado que los terraplenes están sometidos a deformaciones considerables durante todas las etapas ordinarias de su vida. La información recabada en la presa José Ma. Morelos a consecuencia del temblor del 14 de Marzo de 1979 muestra que la magnitud de la deformación inducida por sismo puede ser igualmente importante bajo temblores fuertes. De ahí que se puedan alcanzar niveles peligrosos bajo eventos muy fuertes, como en el caso del sismo del 19 de Septiembre de 1985 que provocó agrietamientos en la corona cerca de ambos hombros, en la traza de niveles de arcilla.

Después del sismo del 14 de Marzo de 1979 se observó una pequeña grieta transversal en la zona de aguas arriba de la corona en margen izquierda, así como grietas longitudinales discontinuas tanto en el centro como en la margen derecha en el lado de aguas abajo. De manera similar debido a la ocurrencia del sismo del 19 de Septiembre de 1985 se generó una grieta longitudinal de 100 m con abertura entre 0.5 y 10 cm, que coincidió con el contacto entre el corazón impermeable y los filtros, se presentaron fuertes asentamientos en el centro de la cortina (Figura 3.3).

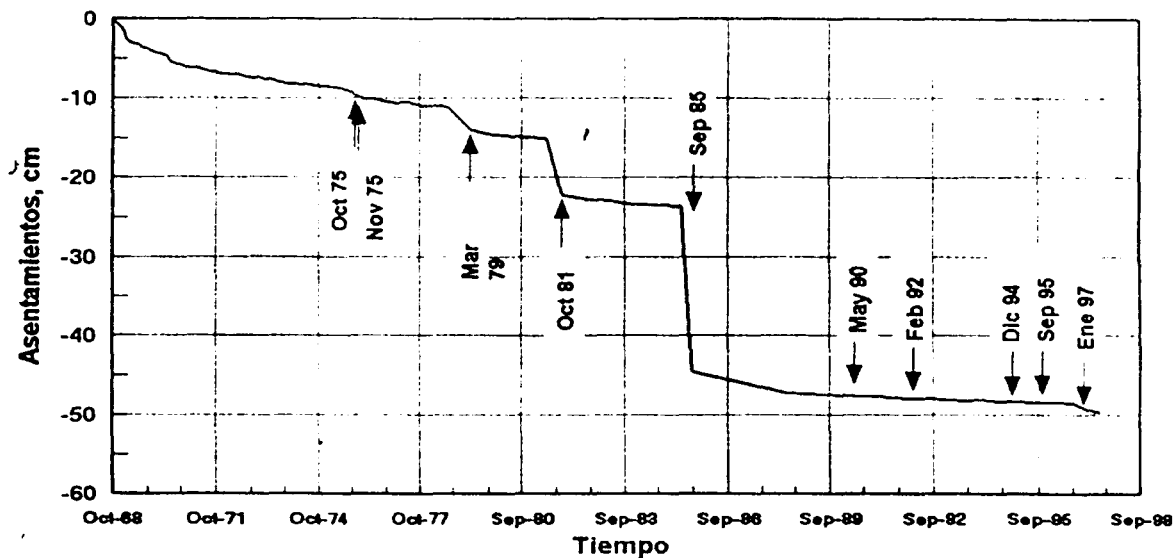


Figura 3.3 Asentamientos de la corona en le cadenamiento 0+325

Los procesos de deformación a lo largo de la vida de una presa incluyen asentamiento y distorsión del terraplén, y desplazamientos horizontales tanto en el sentido del río como en dirección paralela a la corona, los cuales se acentúan durante la ocurrencia de sismos de gran magnitud. La deformación total al centro de la cortina es de casi 50 cm, de los cuales más del 50% se desarrolló durante los sismos de Octubre de 1981 y Septiembre de 1985. Es importante enfatizar que el sismo que desarrolló mayor deformación permanente fue el de Septiembre de 1985. Así también el sismo de Octubre de 1981 provocó 9 cm de asentamiento al centro de la corona, 5 cm más que el del 14 de Marzo de 1979 aún cuando aquél fue de menor magnitud y provocó menor nivel de aceleraciones que este último. Los sismos del 12 de Diciembre de 1994 y 11 de Enero de 1997 provocaron deformaciones permanentes en el cuerpo de la cortina, menores a un par de centímetros.

3.2 Características de vibración de la cortina:

El análisis del comportamiento de presas sometidas a sismos se refieren al cálculo de las deformaciones permanentes o a los daños que pueden inhabilitar a la presa y que son el agrietamiento del núcleo impermeable o la pérdida del bordo libre más abajo del nivel del embalse. Así mismo, es importante caracterizar el comportamiento dinámico de la cortina ante las cargas sísmicas y con ello definir la vulnerabilidad de la cortina y evaluar sus características de vibración con el objetivo de establecer los factores de los sismos que de manera importante la afectan, y con ello recomendar, en lo posible, modificaciones en el diseño de nuevas estructuras terréas. Por tanto los análisis cuantitativos de la cortina de la presa José Ma. Morelos sometida a la vibración sísmica se presentan a partir de información recabada desde el año de 1972 hasta Agosto del 2000, según se observa en las gráficas realizadas a través de los datos calculados en un programa de computadora con el Método de Vibraciones Aleatorias,

de donde se obtuvieron las funciones de coherencia, las funciones de transferencia, los espectros de respuesta y los ángulos de fase.

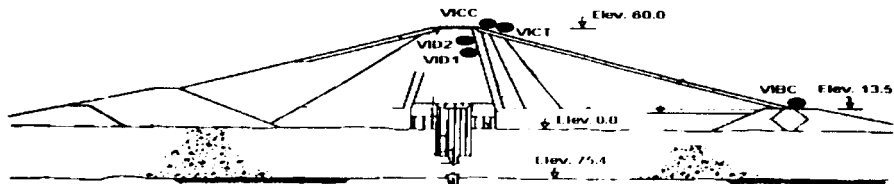
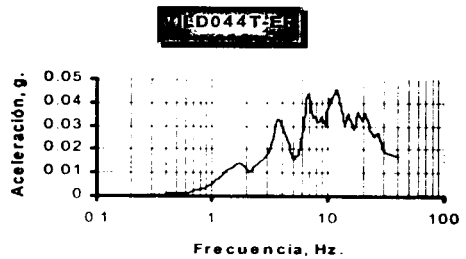
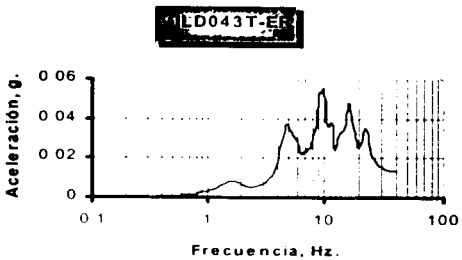
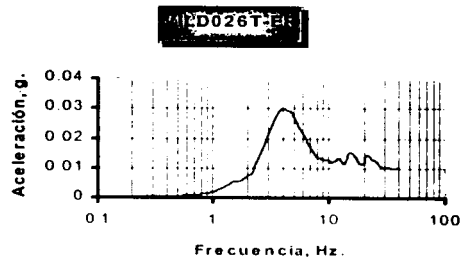
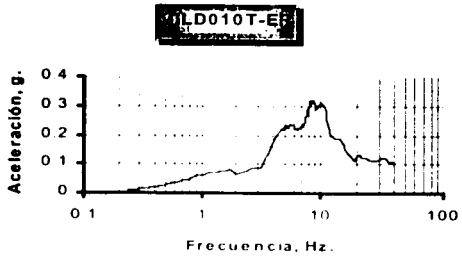
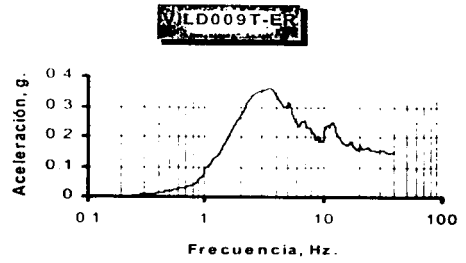
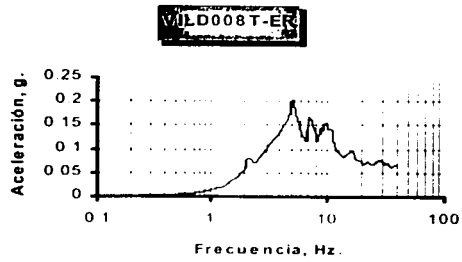


Figura 3.4 Espectros de respuesta

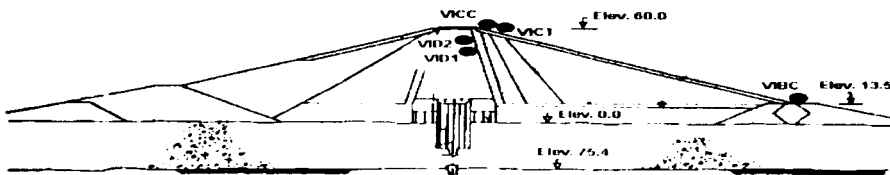
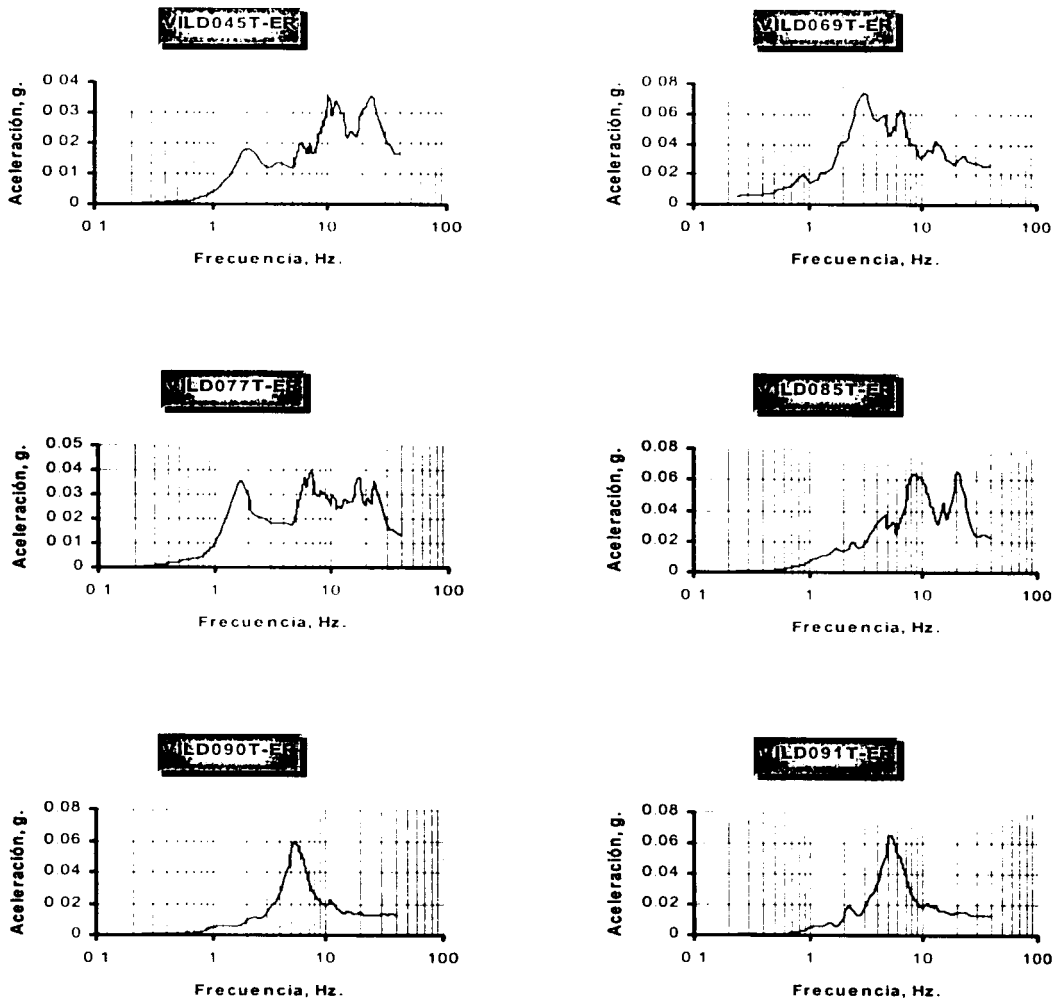


Figura 3.4 Espectros de respuesta

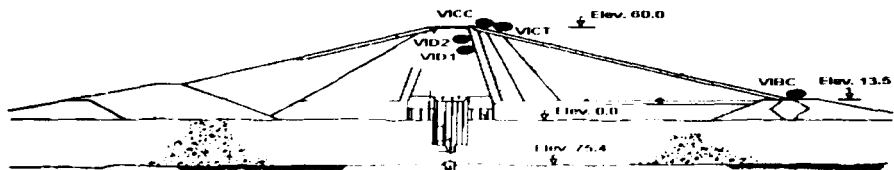
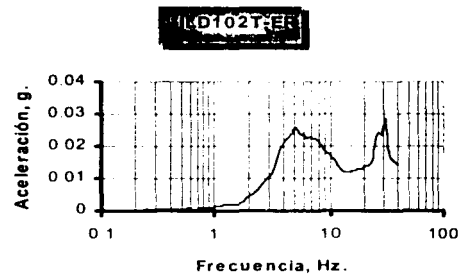
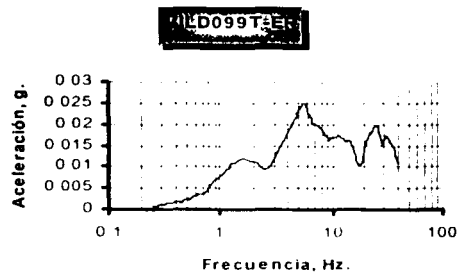
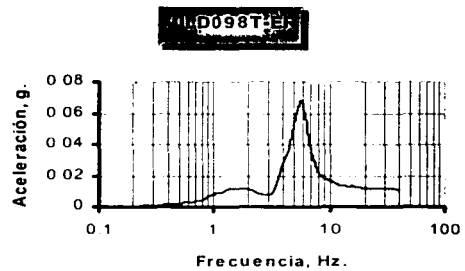
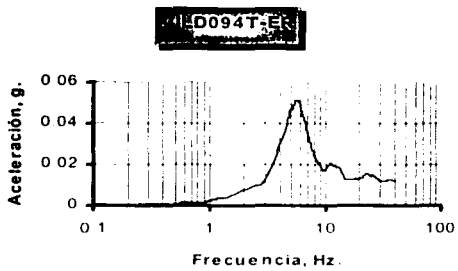
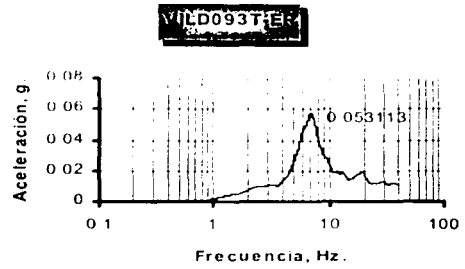
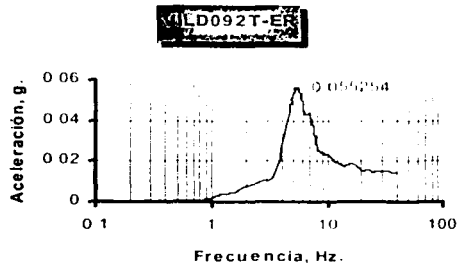


Figura 3.4 Espectros de respuesta

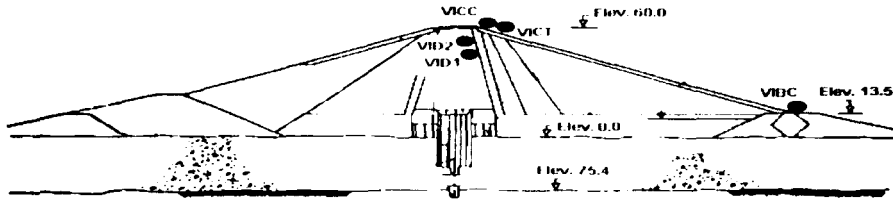
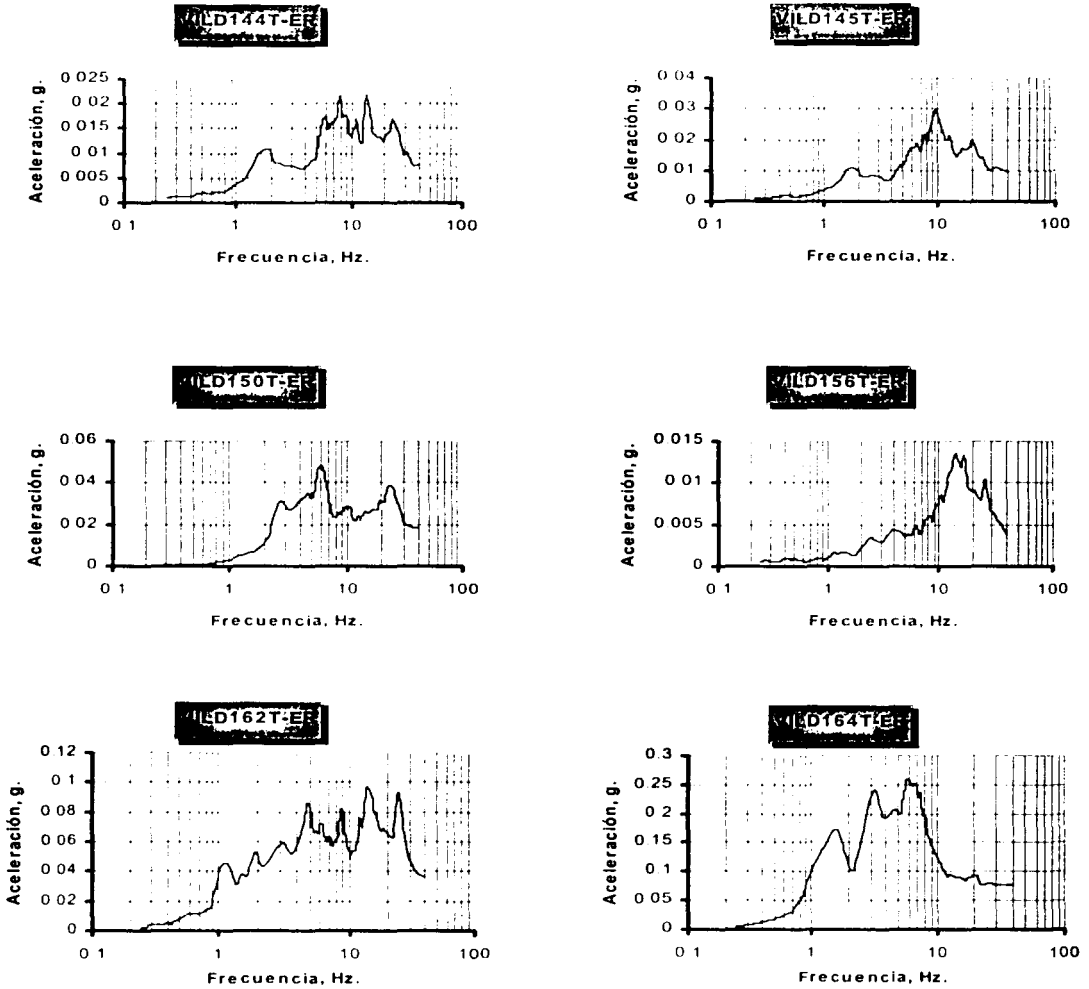


Figura 3.4 Espectros de respuesta

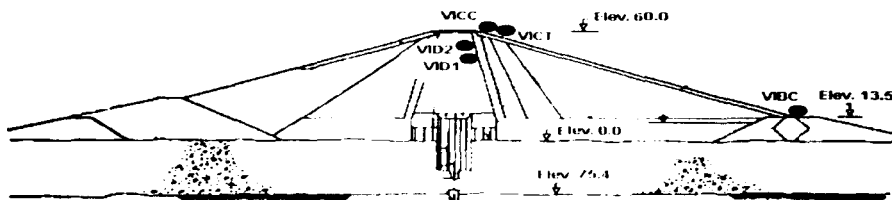
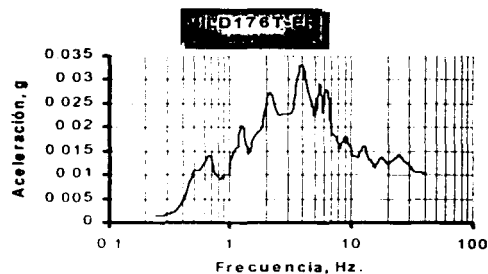
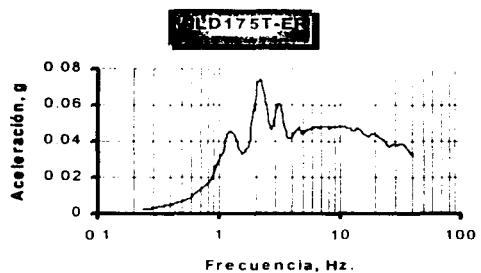
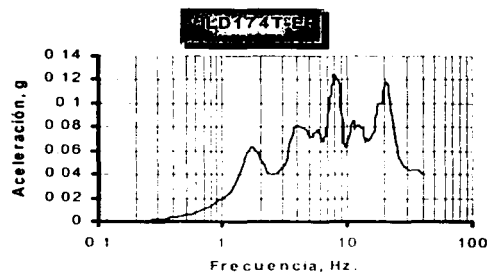
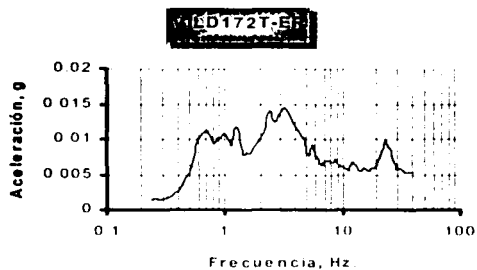
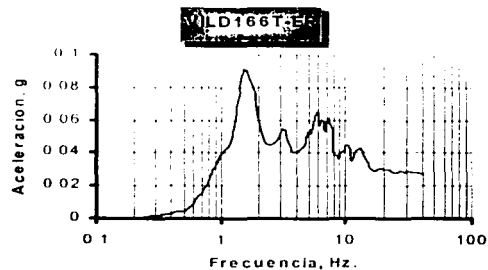
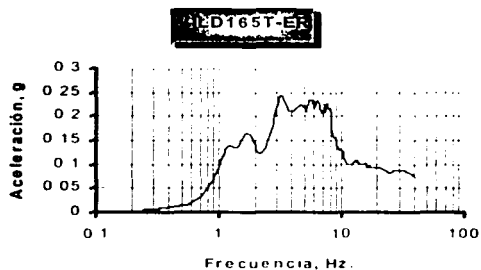


Figura 3.4 Espectros de respuesta

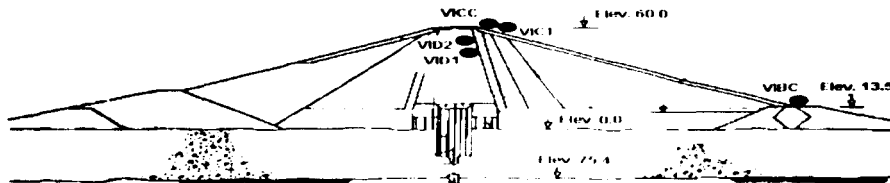
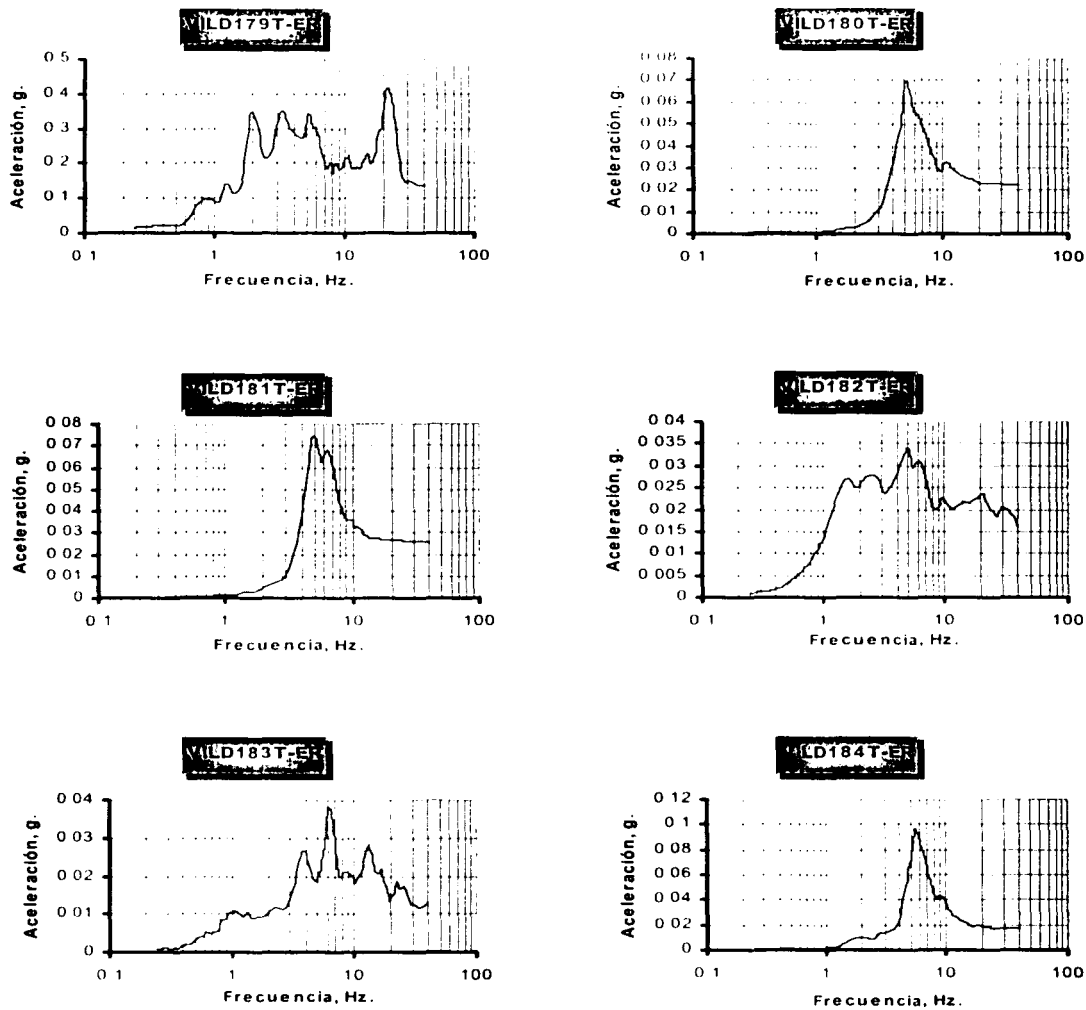


Figura 3.4 Espectros de respuesta

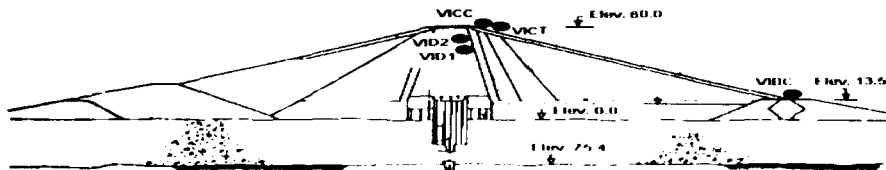
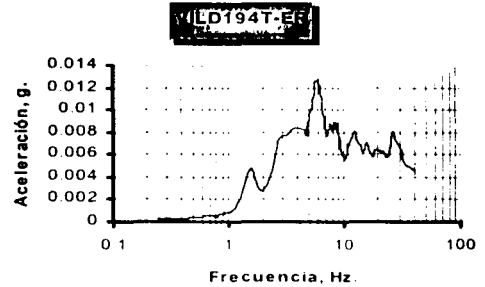
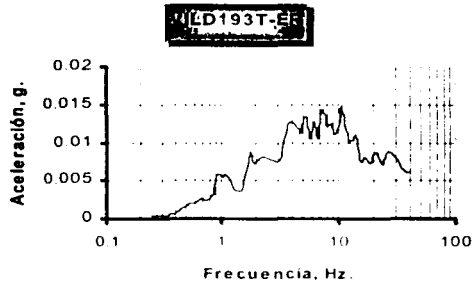
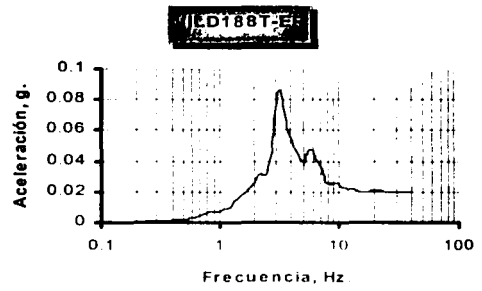
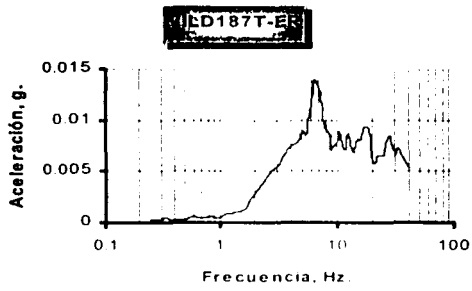
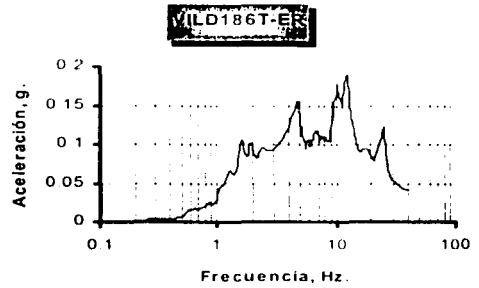
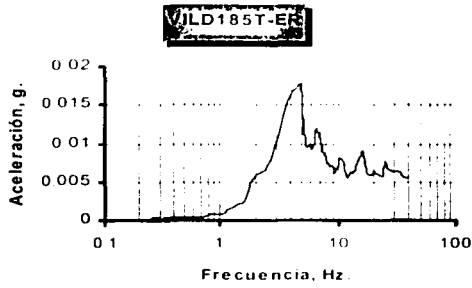


Figura 3.4 Espectros de respuesta

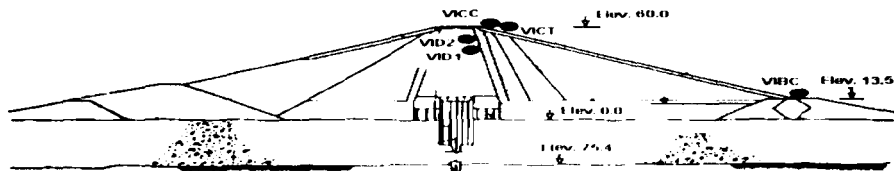
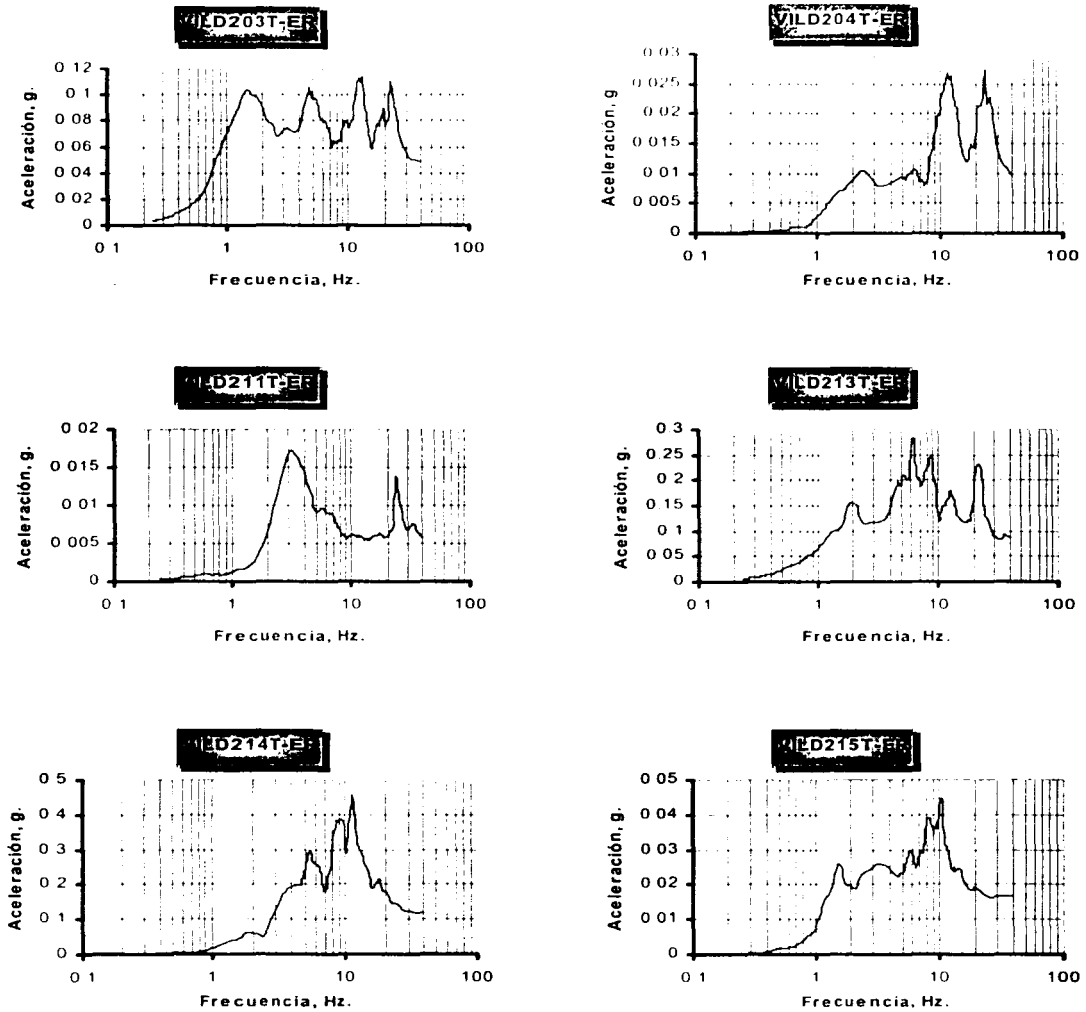


Figura 3.4 Espectros de respuesta

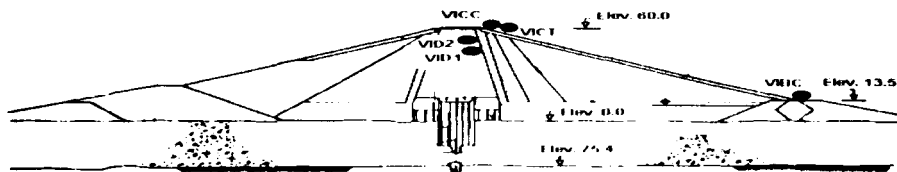
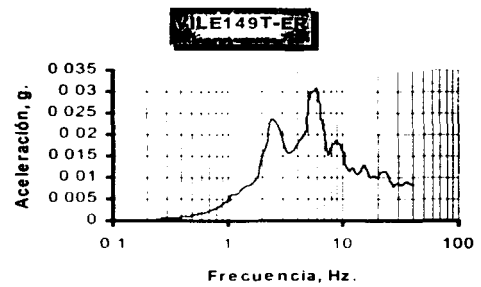
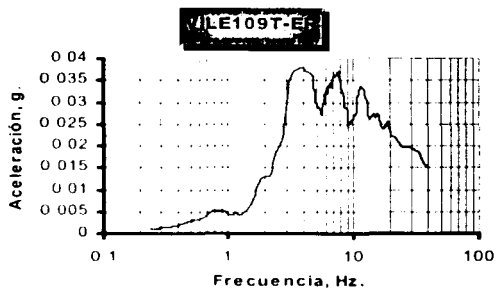
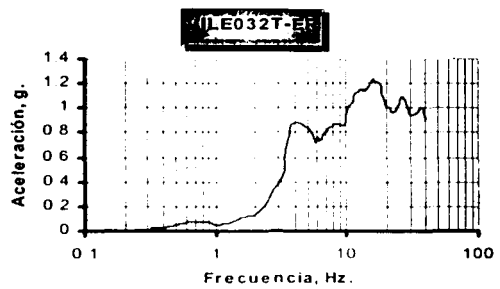
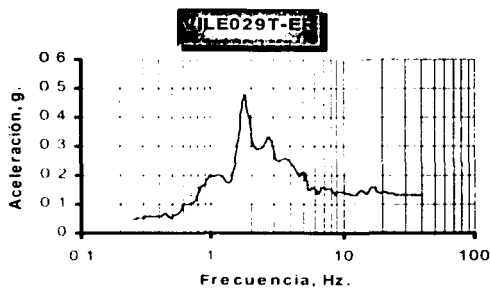
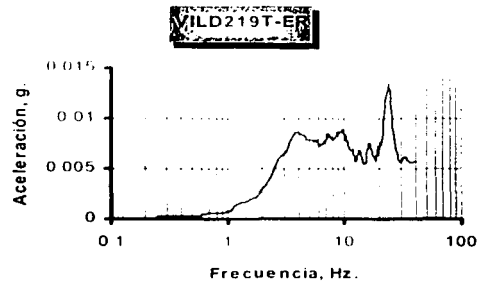
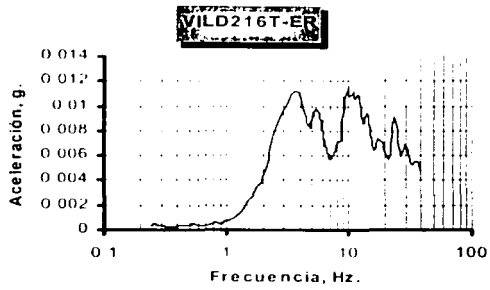


Figura 3.4 Espectros de respuesta

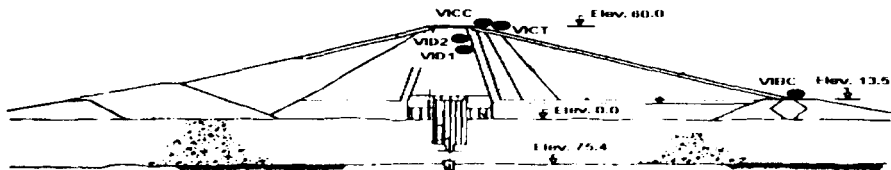
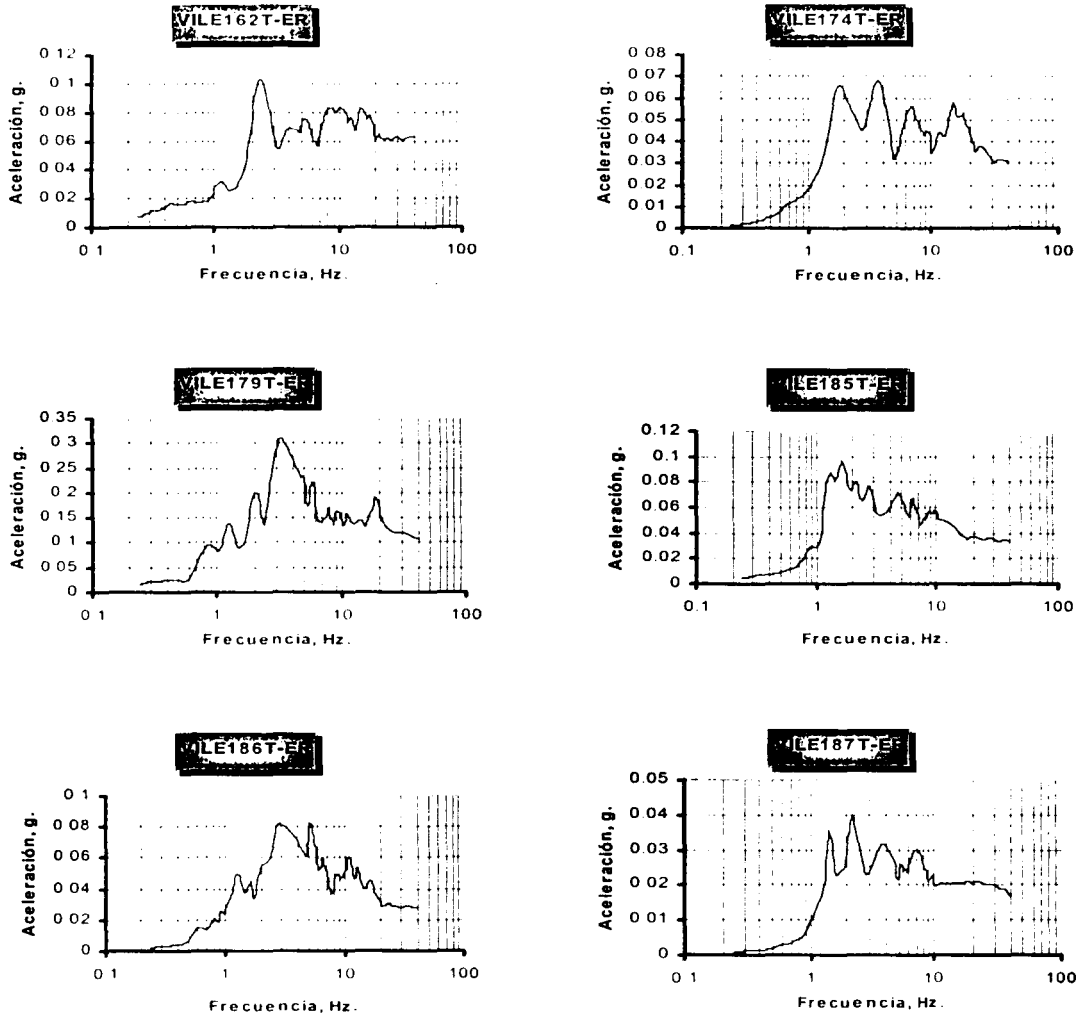


Figura 3.4 Espectros de respuesta

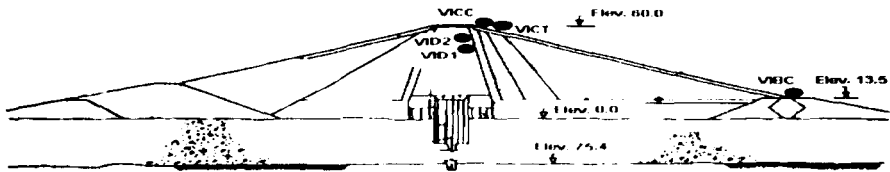
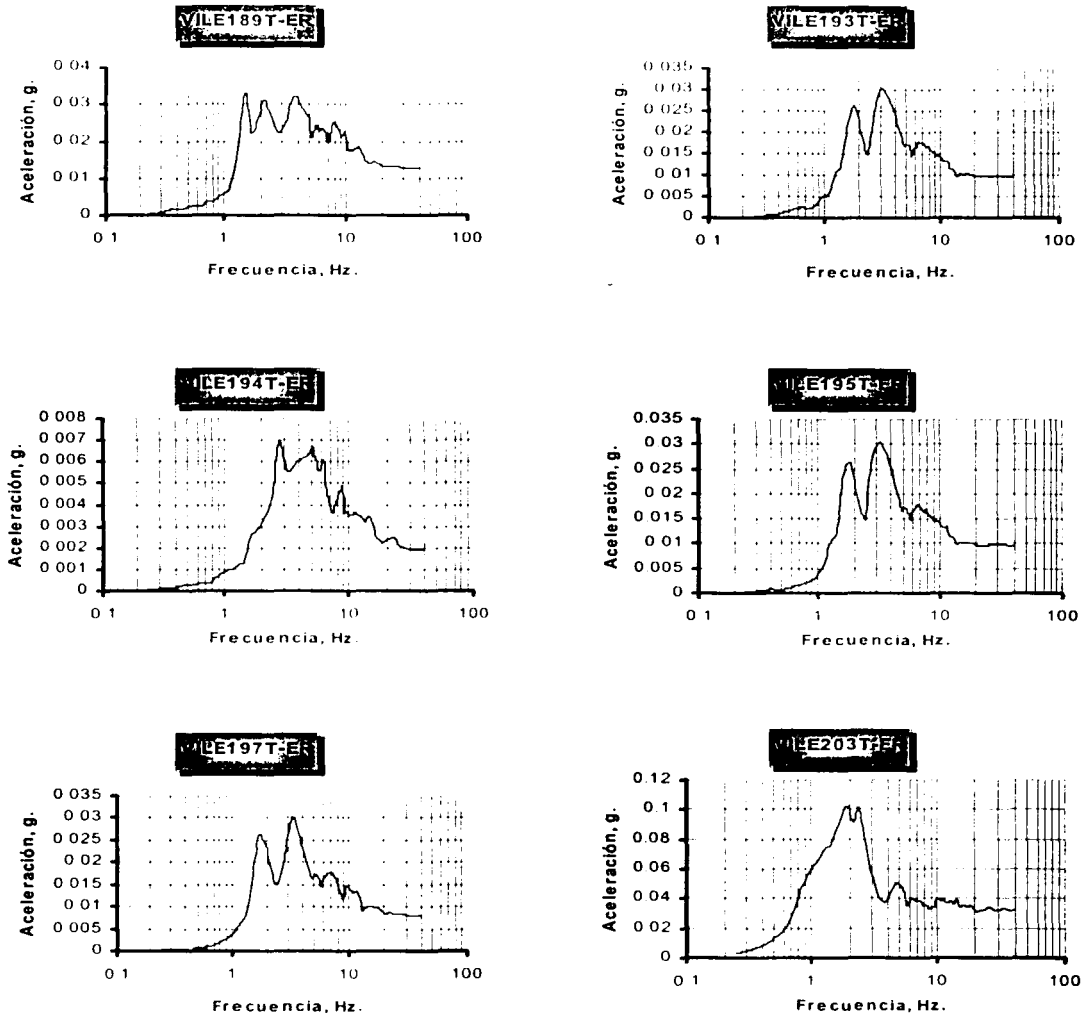


Figura 3.4 Espectros de respuesta

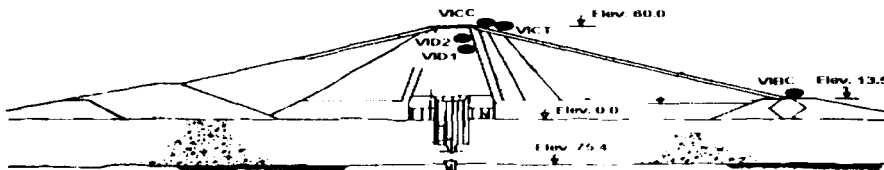
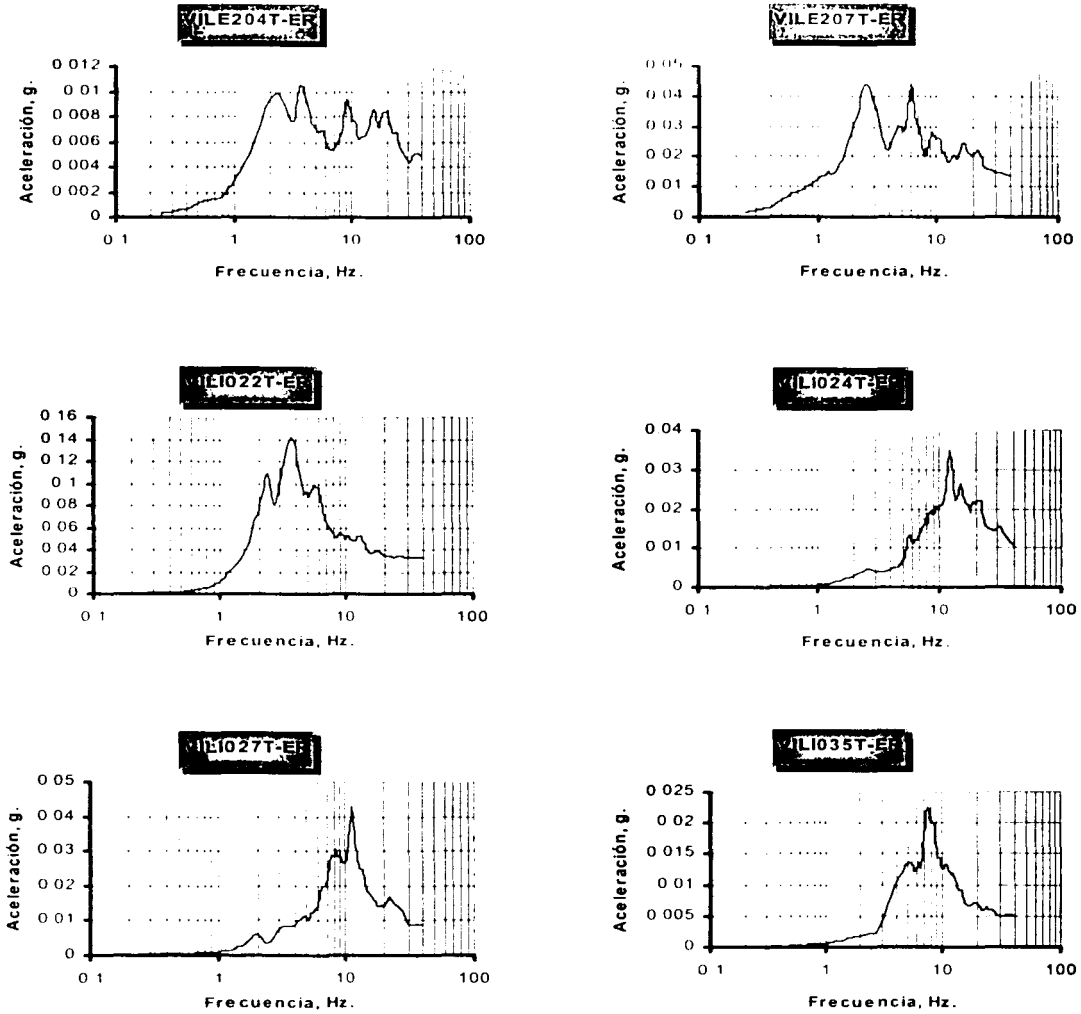


Figura 3.4 Espectros de respuesta

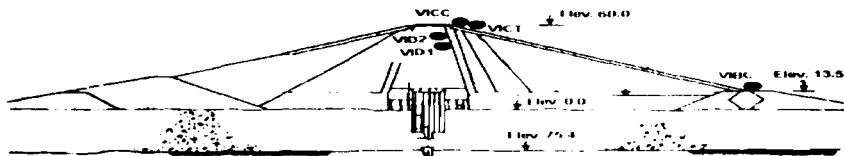
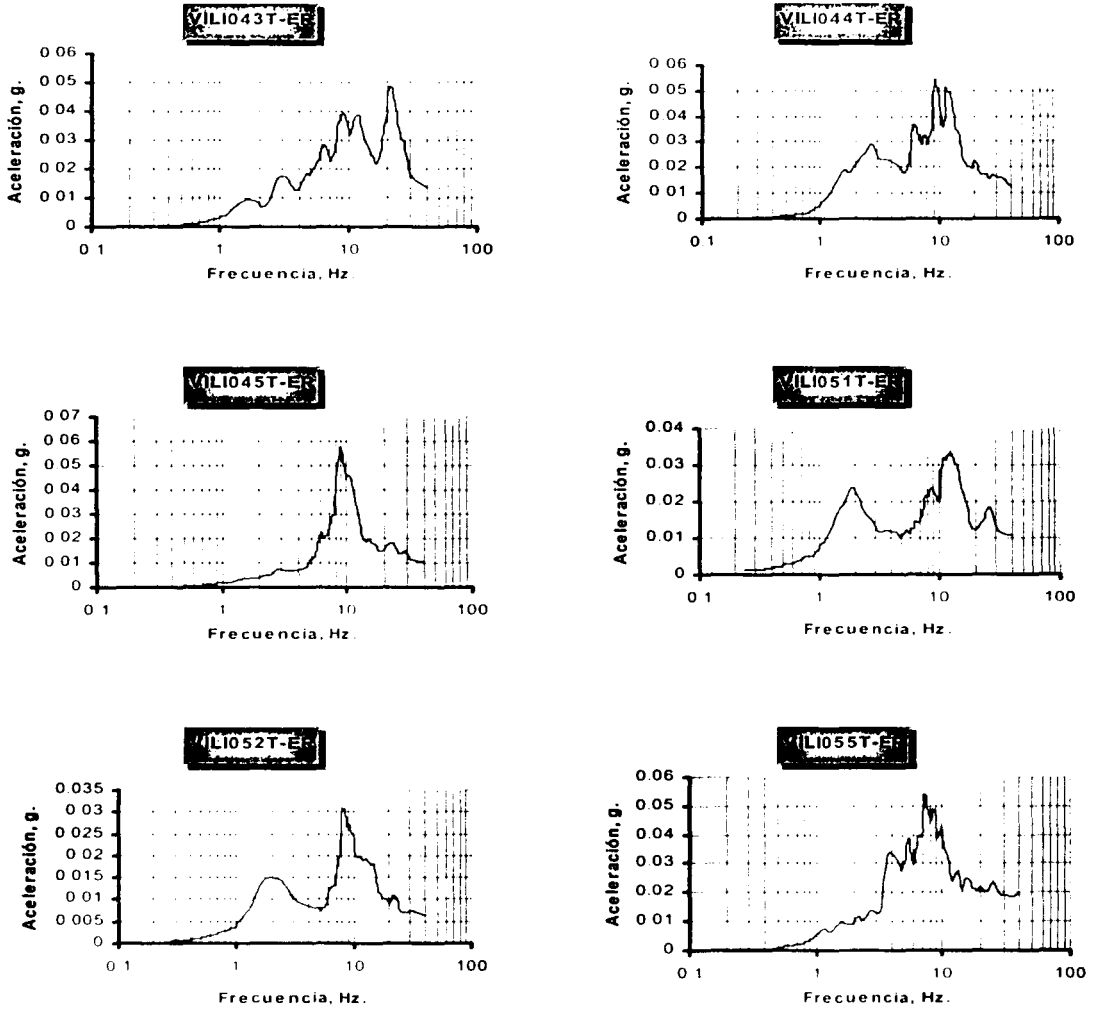


Figura 3.4 Espectros de respuesta

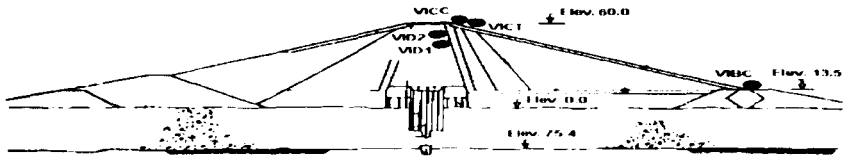
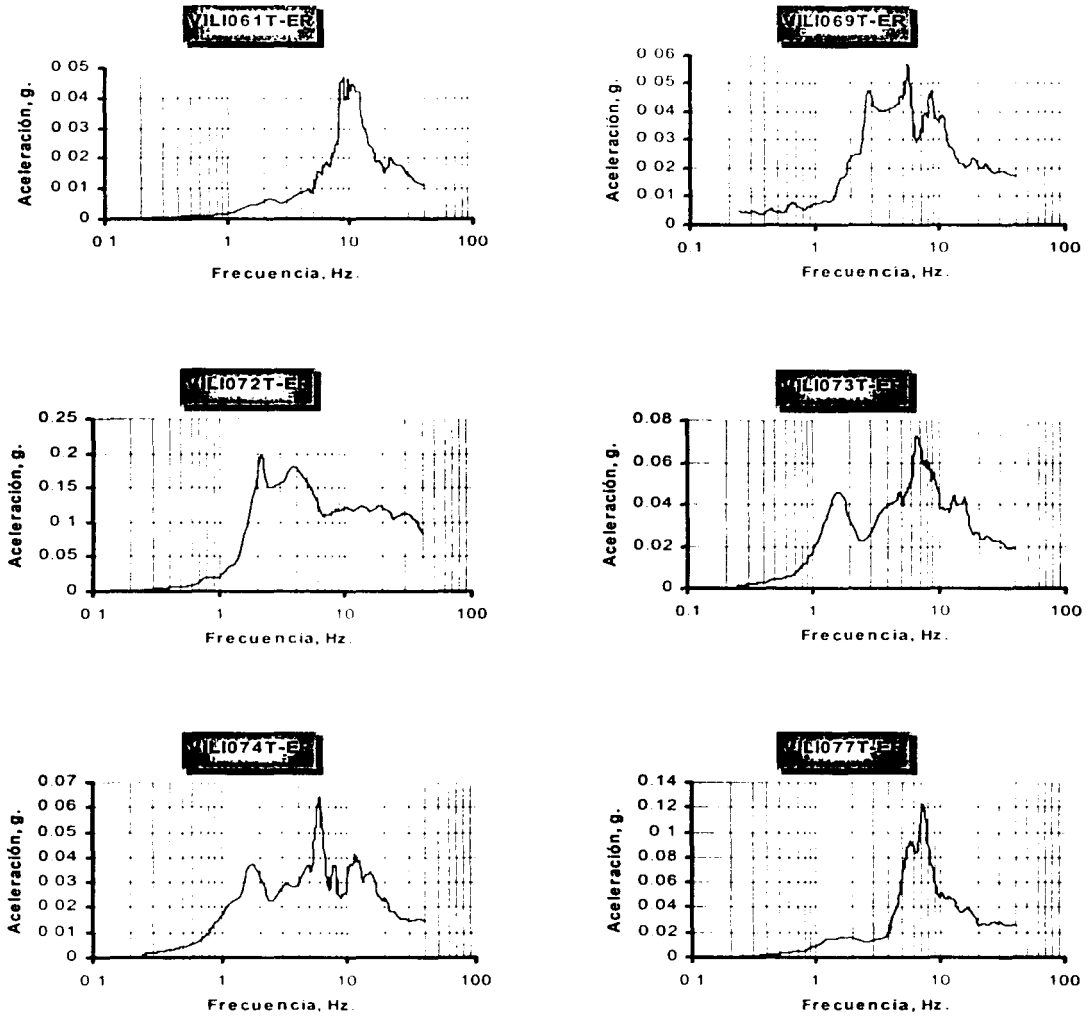
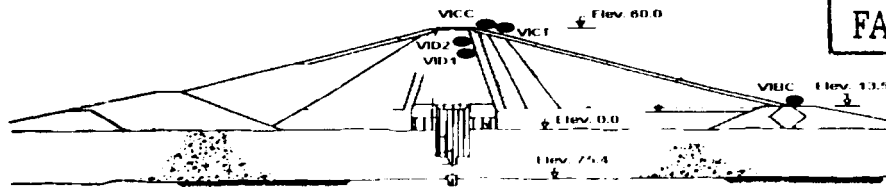
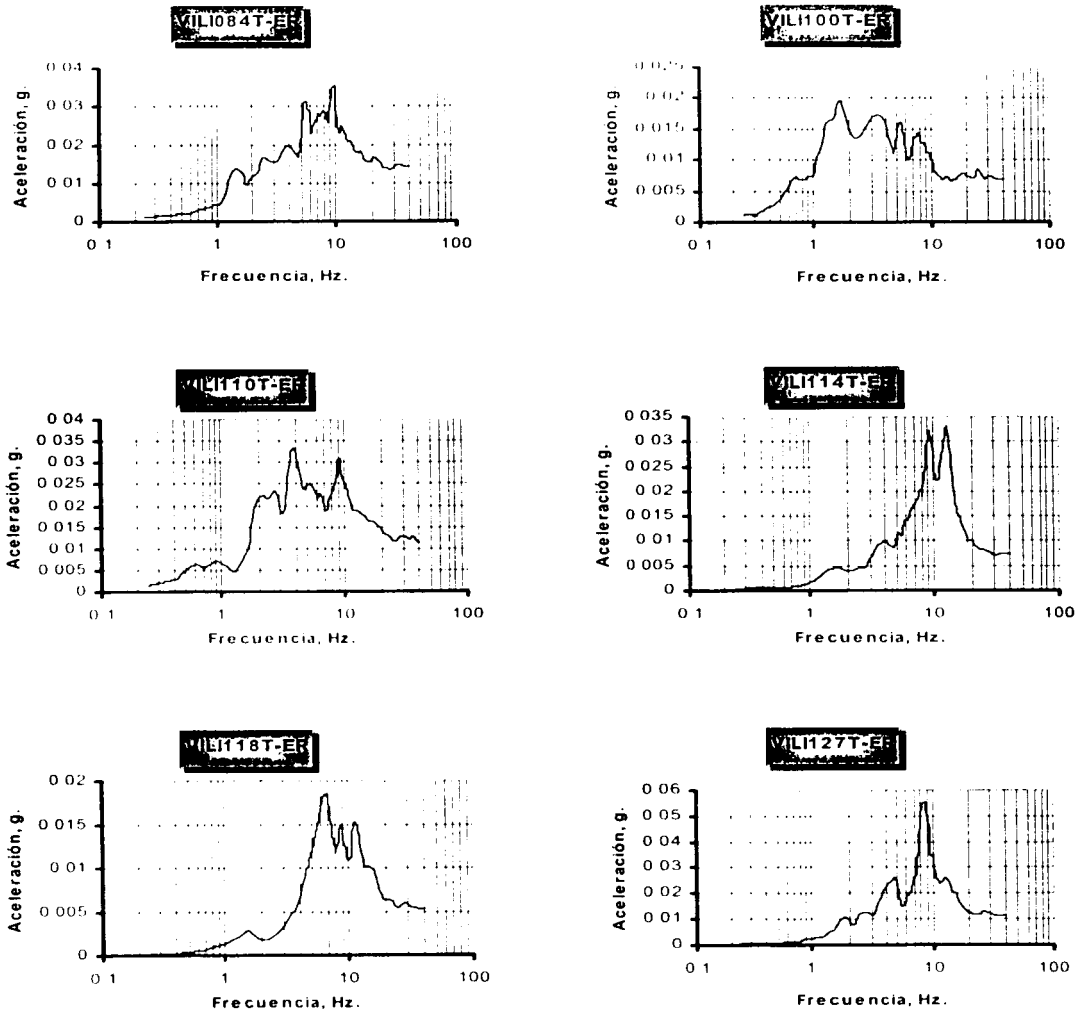


Figura 3.4 Espectros de respuesta



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3.4 Espectros de respuesta

NO SE PUEDE SALIR DE LA BIBLIOTECA

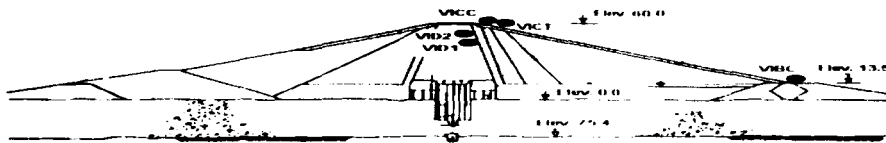
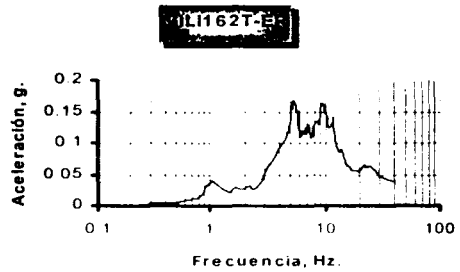
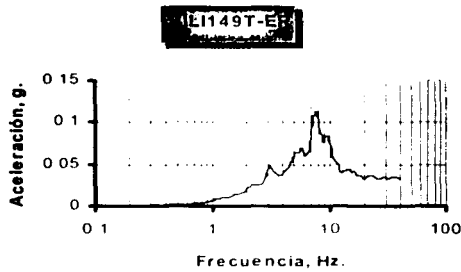
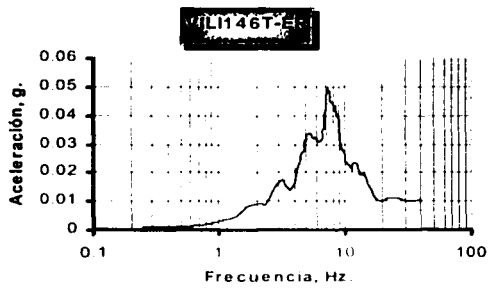
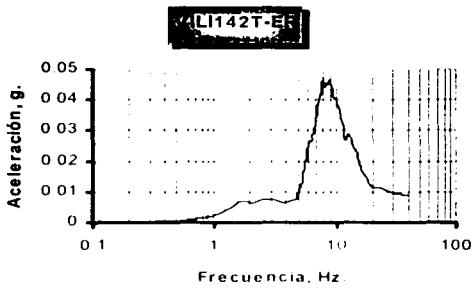
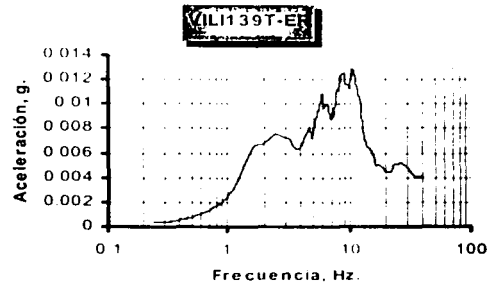
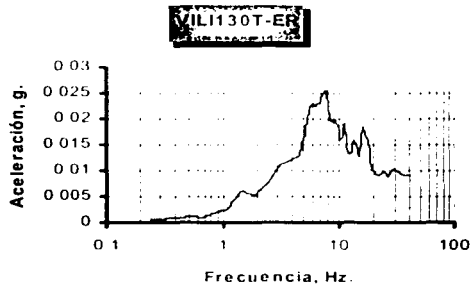


Figura 3.4 Espectros de respuesta

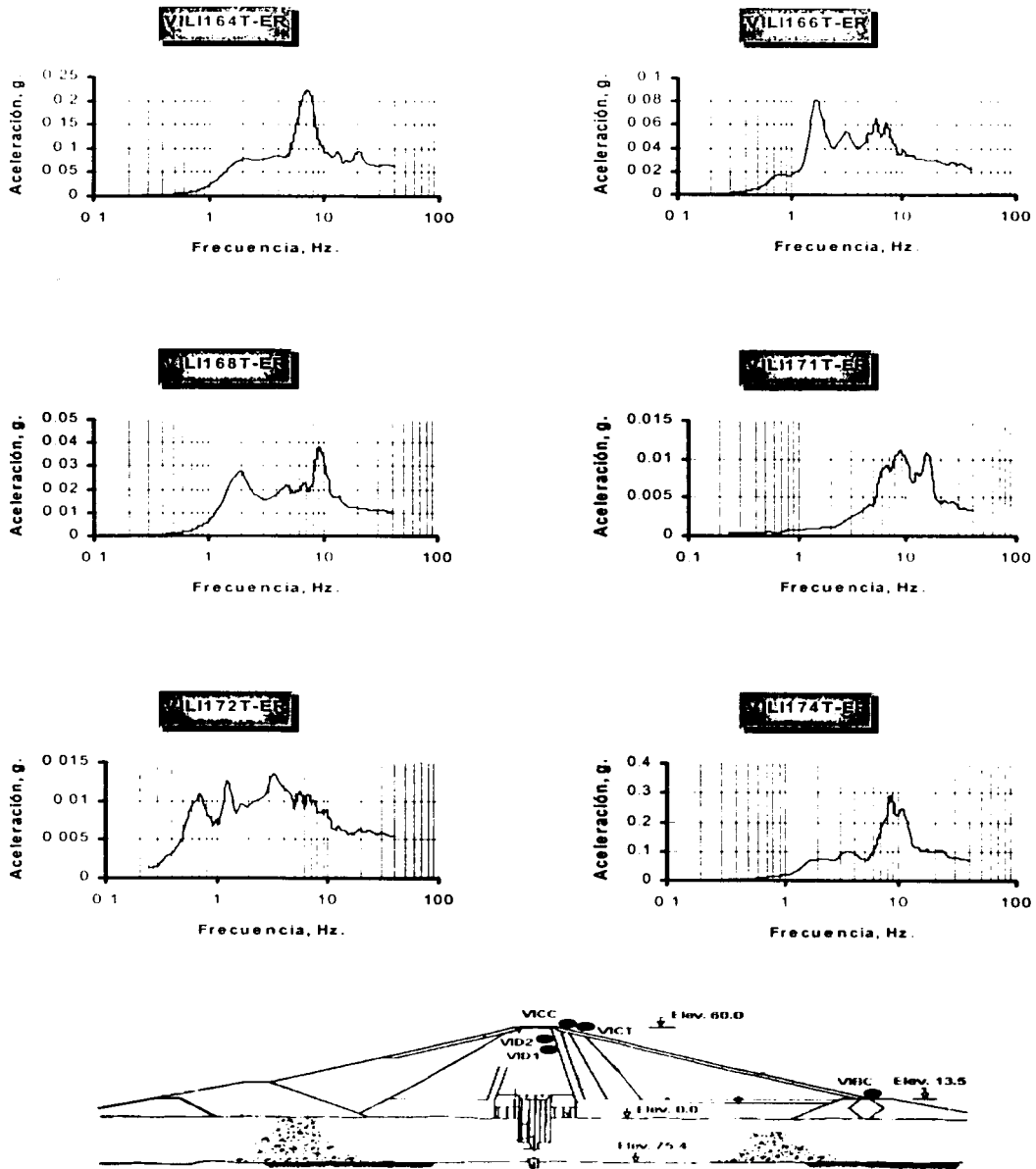


Figura 3.4 Espectros de respuesta

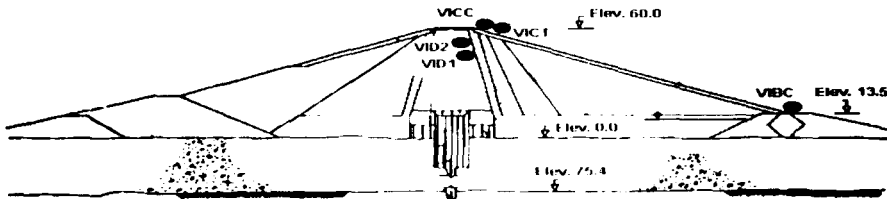
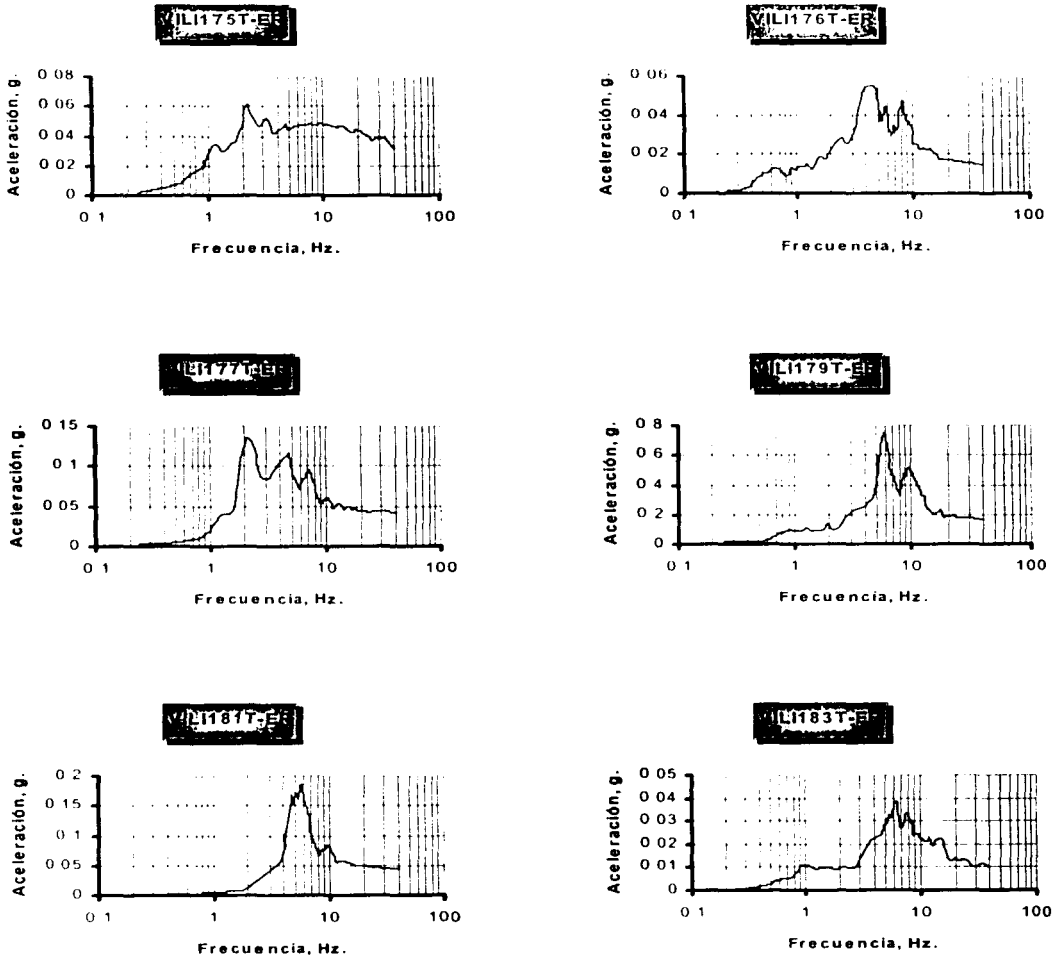


Figura 3.4 Espectros de respuesta

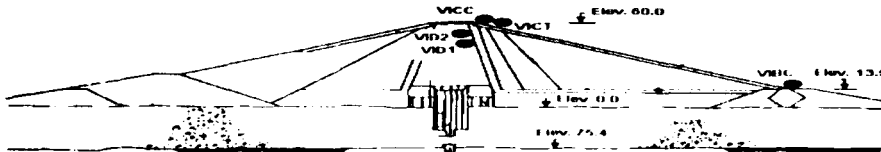
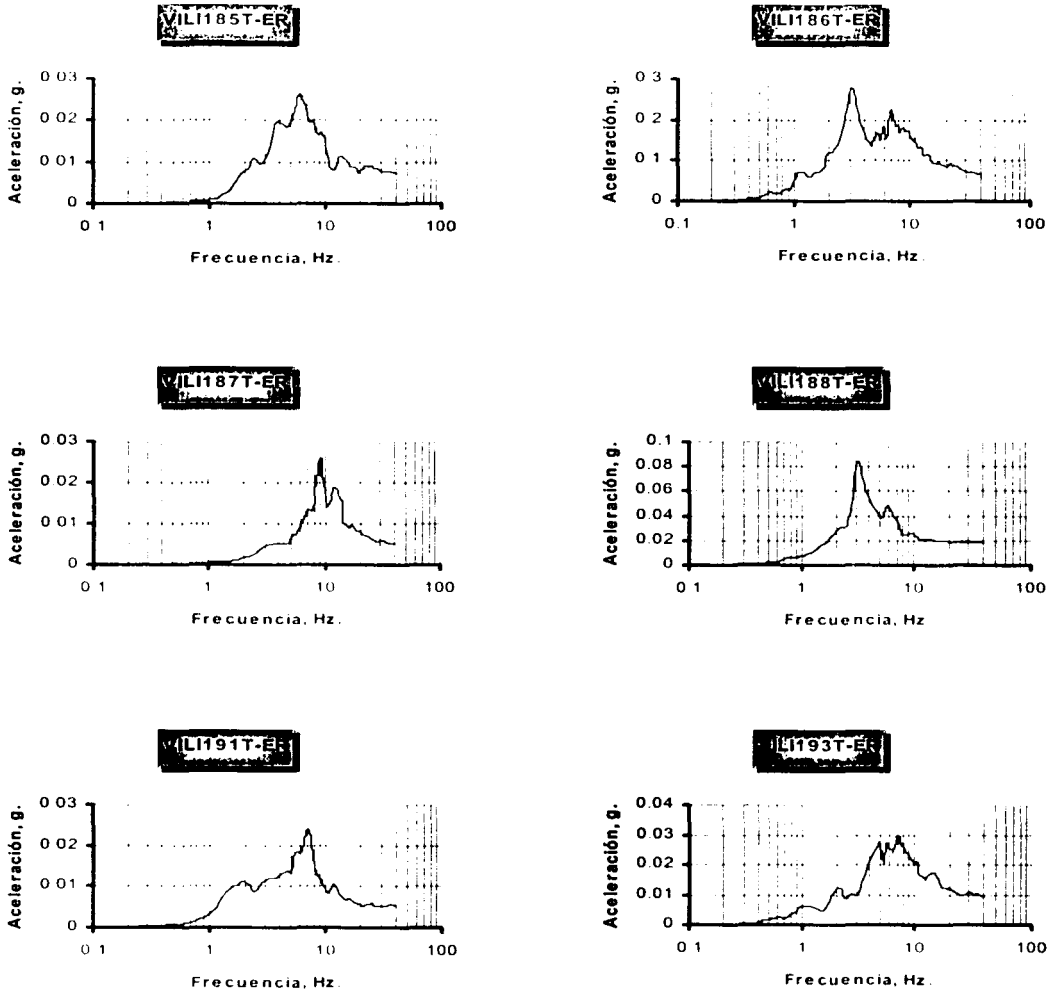


Figura 3.4 Espectros de respuesta

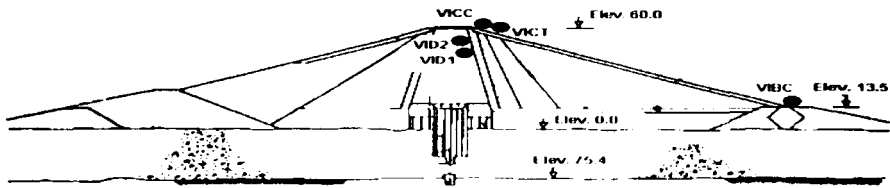
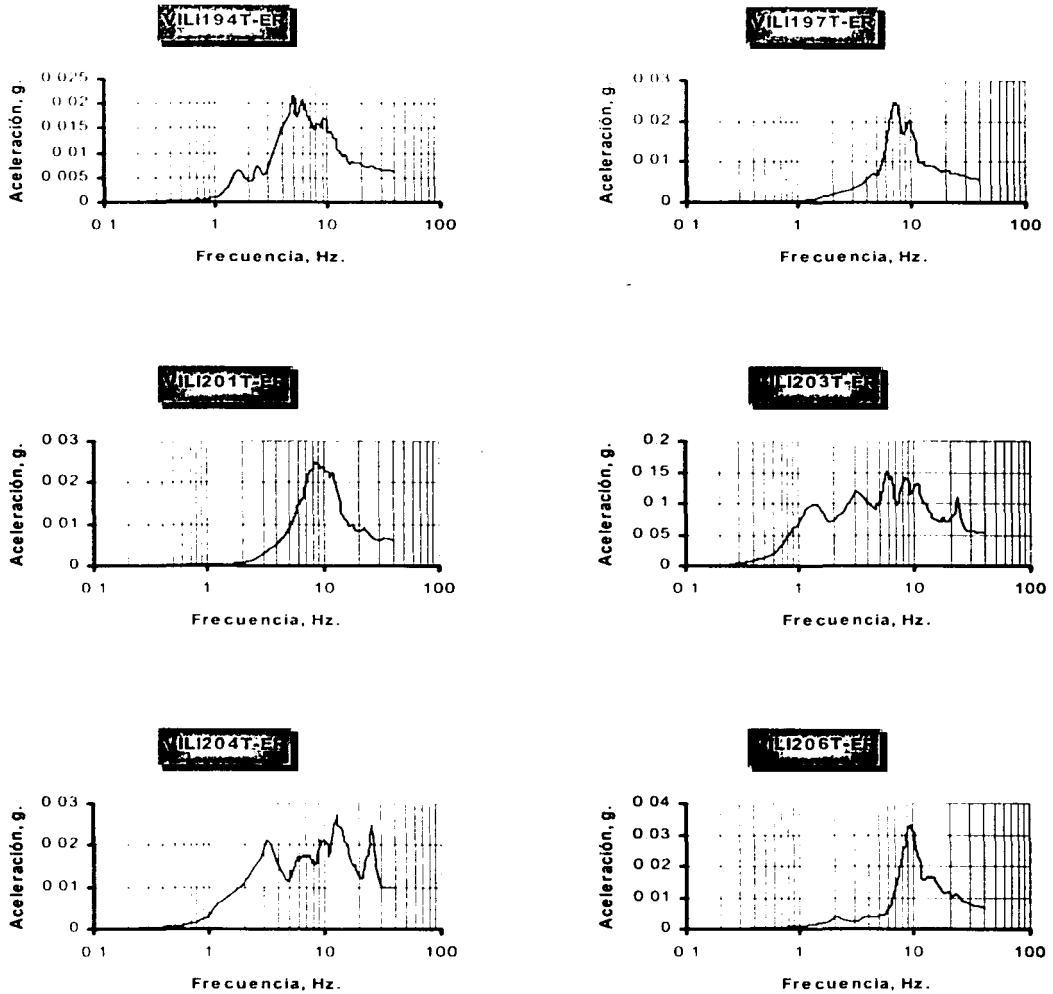


Figura 3.4 Espectros de respuesta

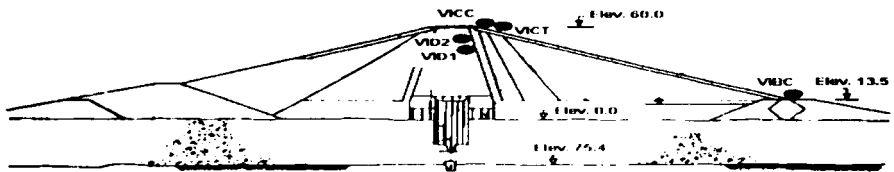
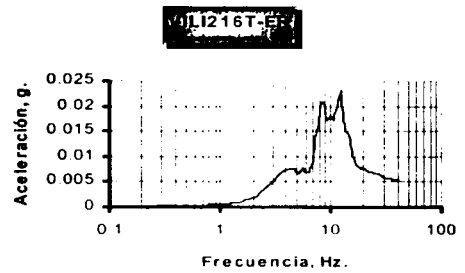
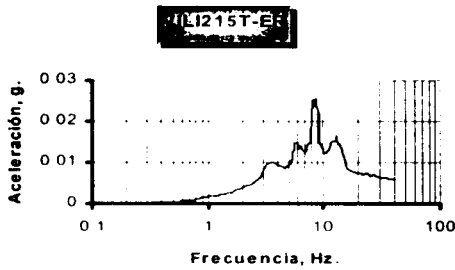
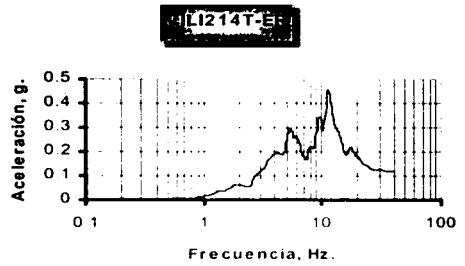
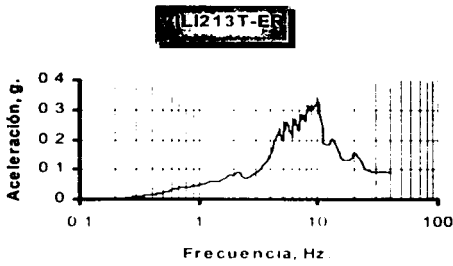
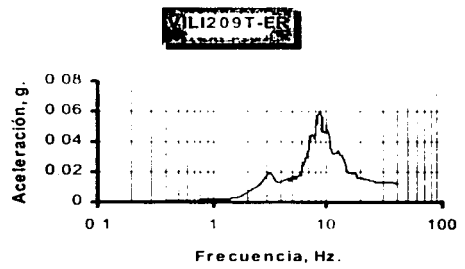
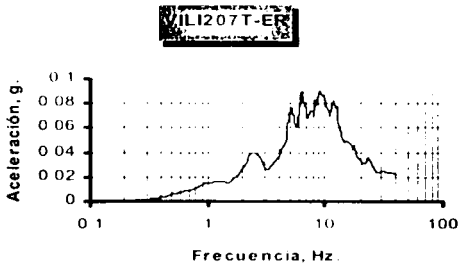


Figura 3.4 Espectros de respuesta

... ..

... ..

Los espectros de respuesta de los sismos utilizados en la presa José Ma. Morelos se presentan en la figura 3.4. En esta se dibujan los espectros de los sismos registrados en la margen derecha y en la margen izquierda de la presa. En la mayoría de los espectros se observa que la energía se concentra entre 0.5 y 20 Hz; sin embargo para los sismos del 21 y 24 de Septiembre de 1985, 12 y 14 de Febrero de 1992, 11 de Enero de 1997, 21 y 22 de junio de 1999 y 9 y 10 de agosto de 2000 la energía se concentra en valores mayores a 20 Hz.

Los sismos registrados en la roca de la margen derecha de la presa José Ma. Morelos están influenciados por la cortina y la obra de excedencias y de generación por encontrarse estas obras en ambos extremos de acelerógrafo. También en reportes de las visitas de inspección se ha indicado que el material de desplante del acelerógrafo de la margen derecha esta menos alterado que el de la margen izquierda, incluso se ha mencionado que el material de esta última margen ha sufrido deslave por lluvia.

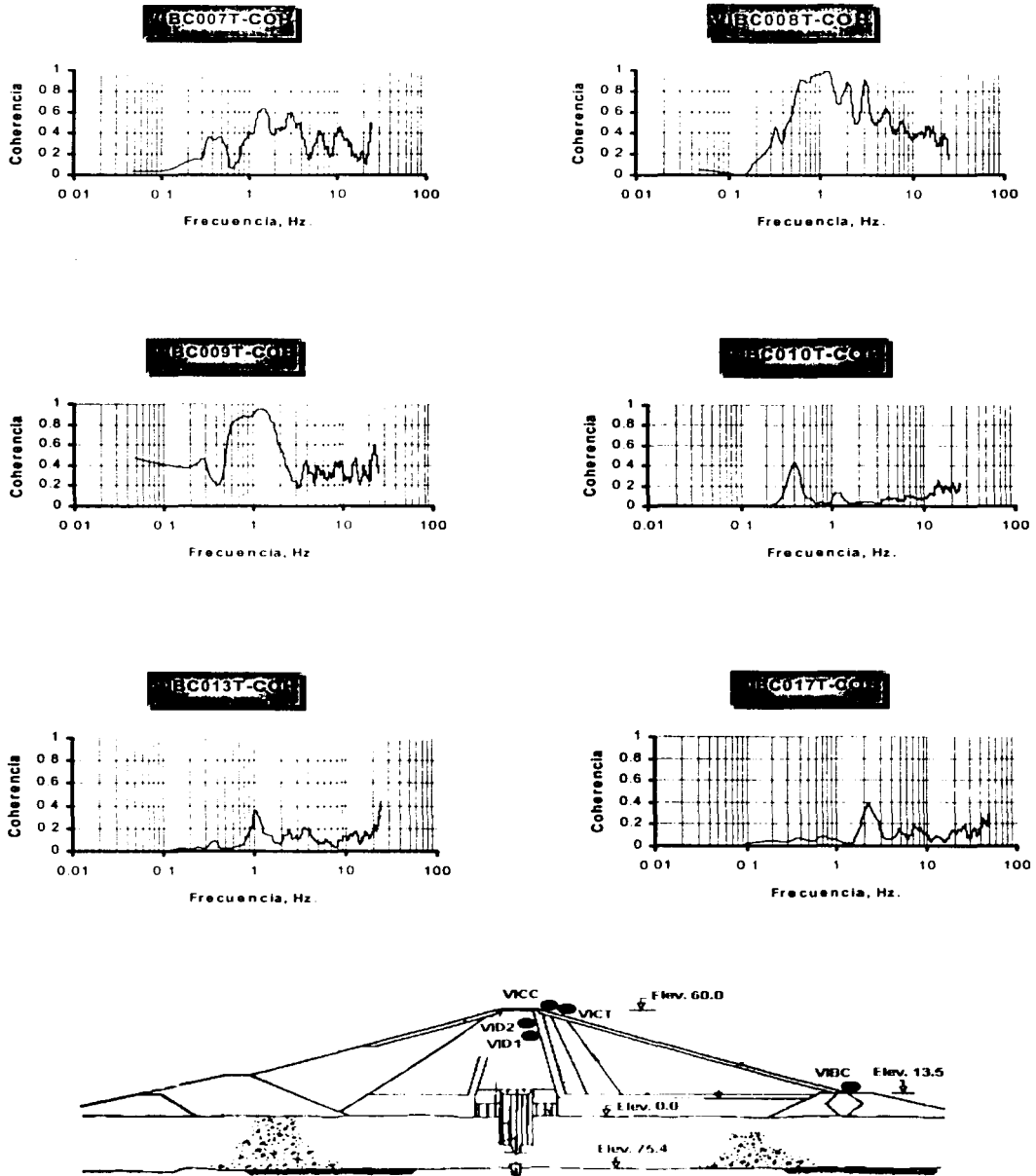


Figura 3.5 Funciones de coherencia de la base a la corona de la Presa

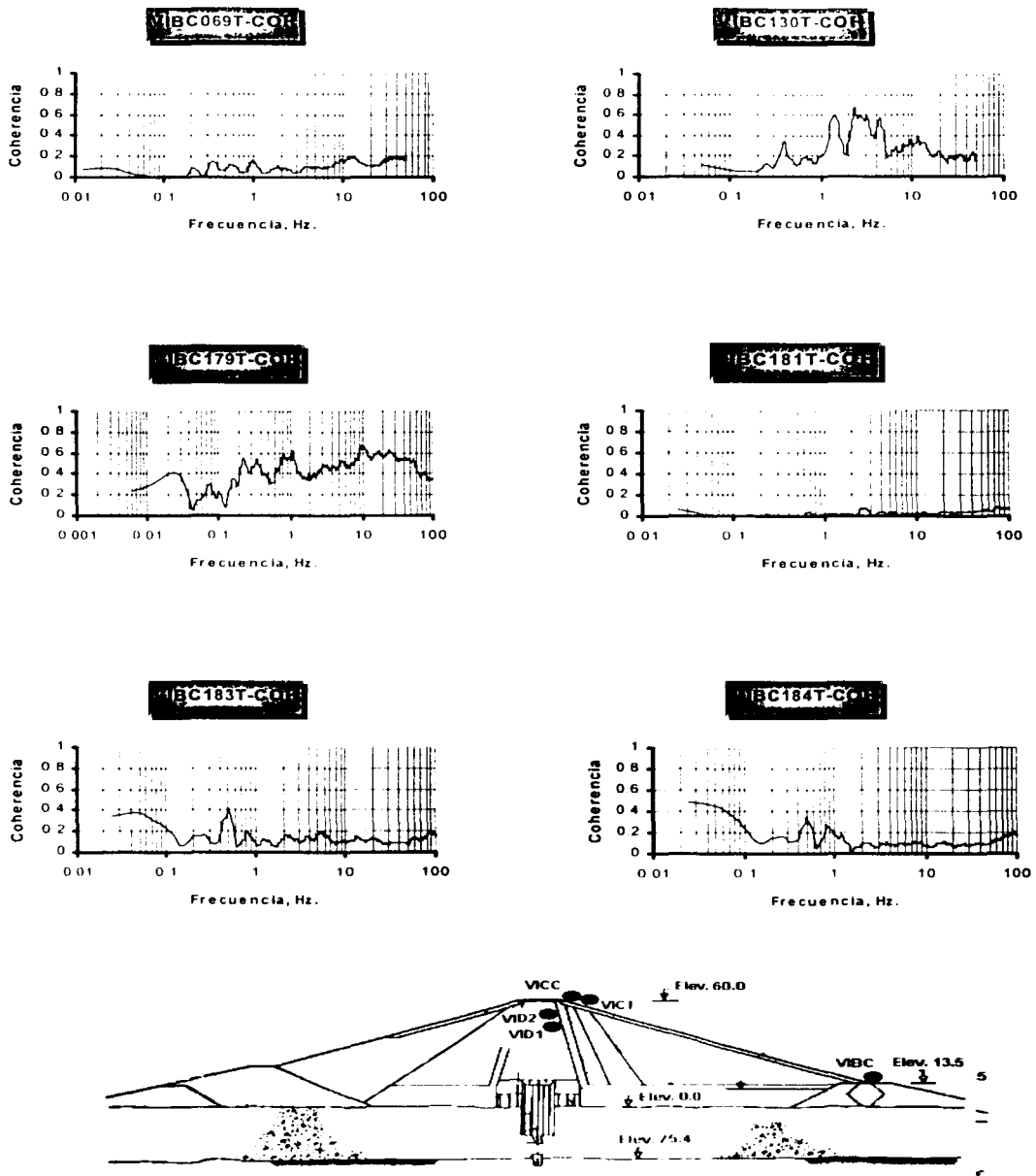


Figura 3.5 Funciones de coherencia de la base a la corona de la Presa

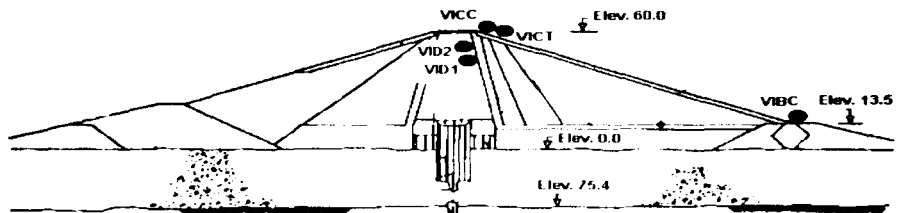
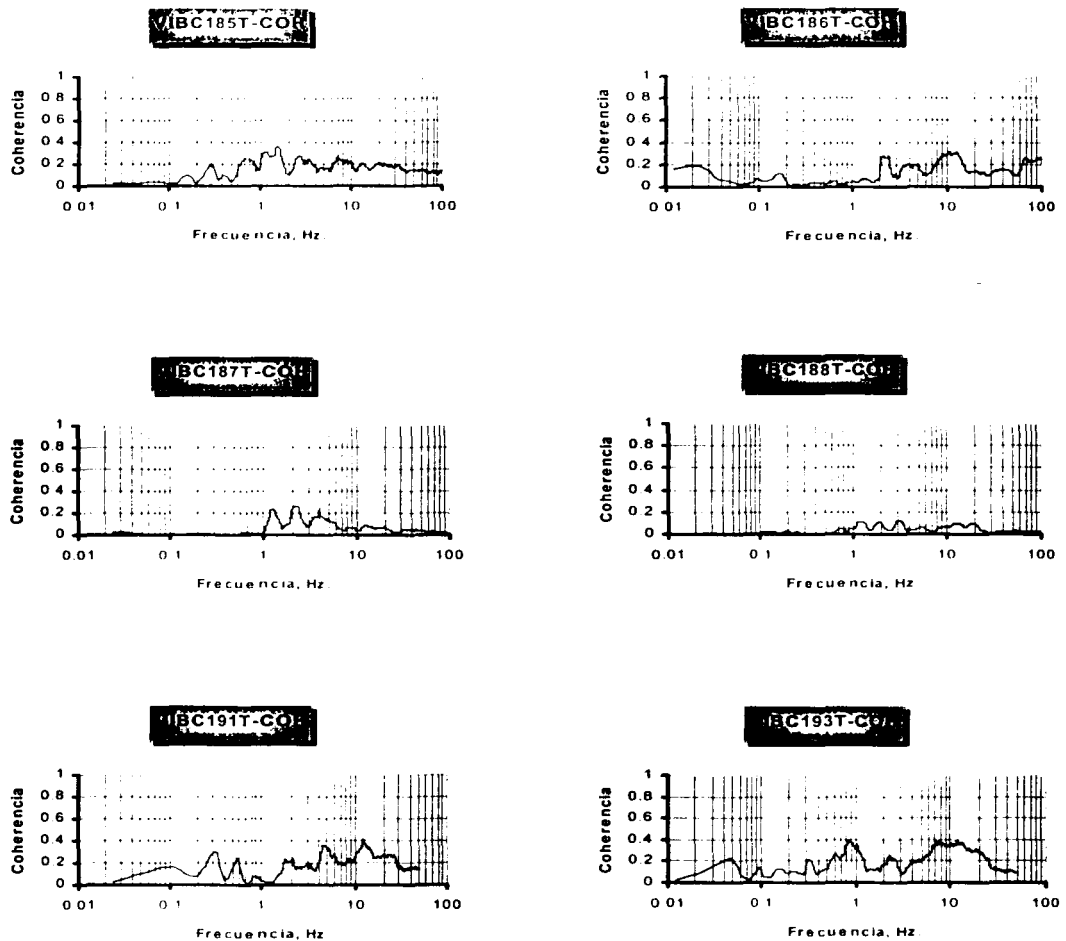


Figura 3.5 Funciones de coherencia de la base a la corona de la Presa

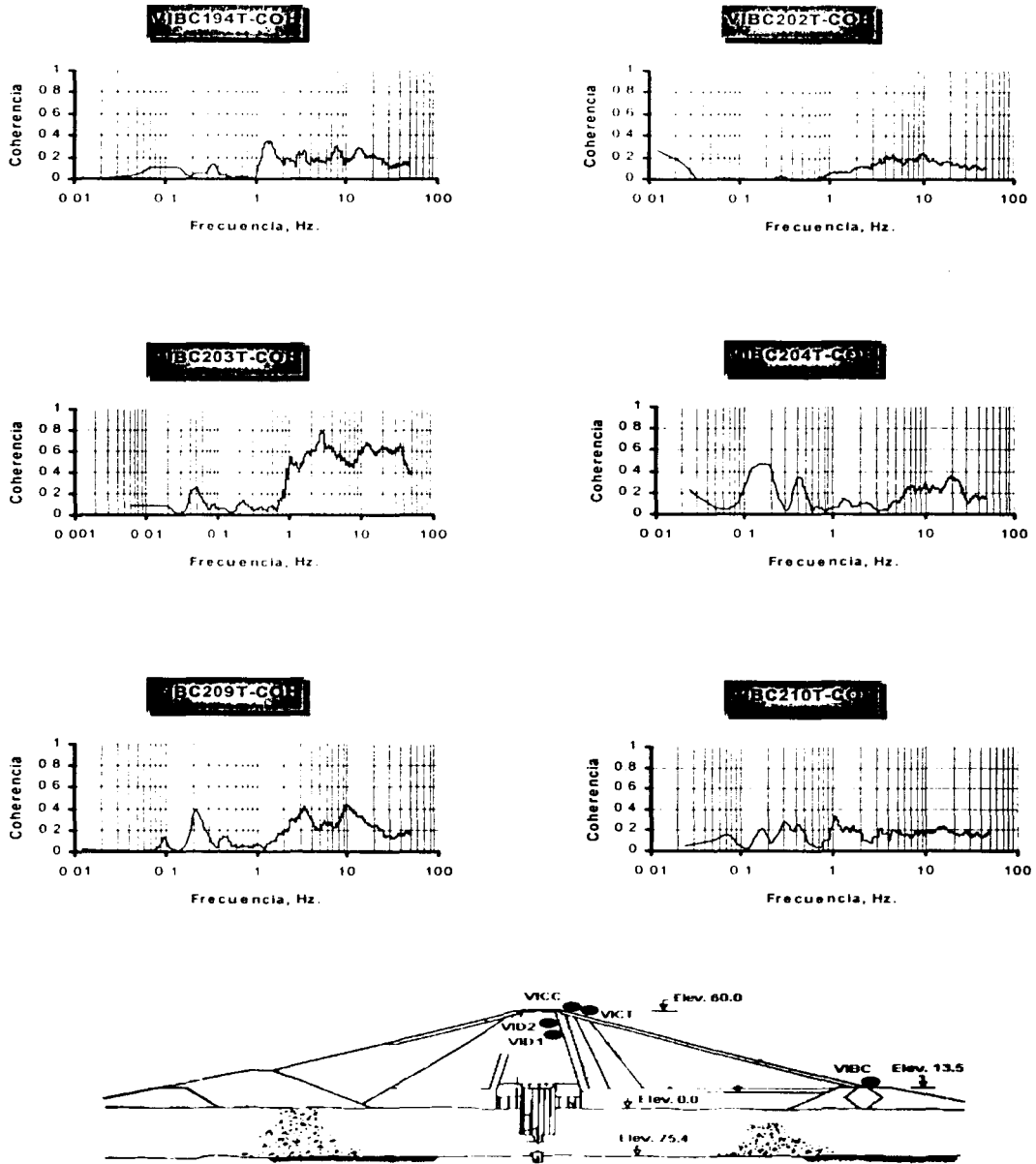


Figura 3.5 Funciones de coherencia de la base a la corona de la Presa

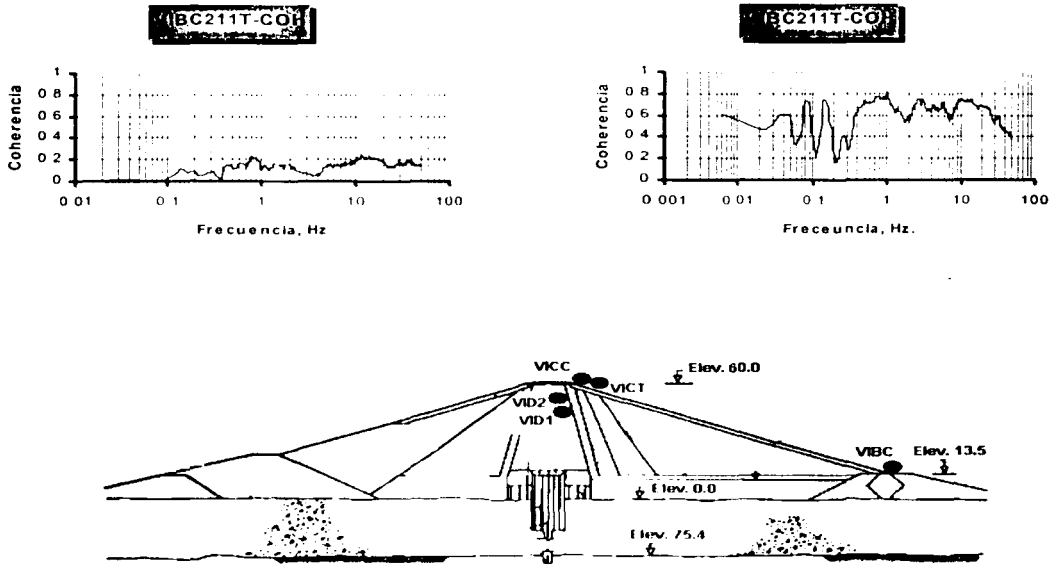


Figura 3.5 Funciones de coherencia de la base a la corona de la Presa

Las funciones de coherencia, muestran valores menores a 0.8 y con algunos valores aislados iguales a la unidad, principalmente en los sismos de Octubre y Noviembre de 1975. La forma de las curvas de la función de coherencia muestra, en general, que los valores son estadísticamente dependientes en el rango de 1 a 2 Hz. Y estadísticamente independientes en frecuencias mayores, es decir la relación de movimiento en estas últimas es diferente en la base que en la corona. De las gráficas mostradas es notorio que no existe una correlación entre los movimientos de la base y los de la corona, con los parámetros más importantes que influyen en el comportamiento dinámico de la estructura. Es decir la distancia epicentral, la magnitud, la directividad y la aceleración no influyen en la dependencia de los movimientos en las dos partes de la cortina, posiblemente el efecto sea encubierto por el espesor del aluvión.

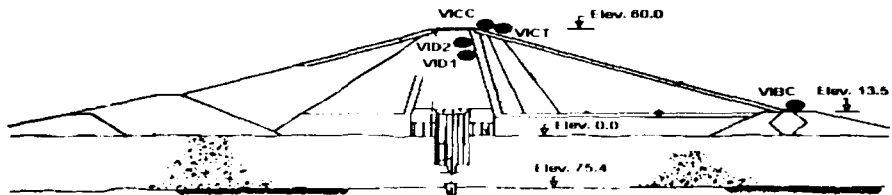
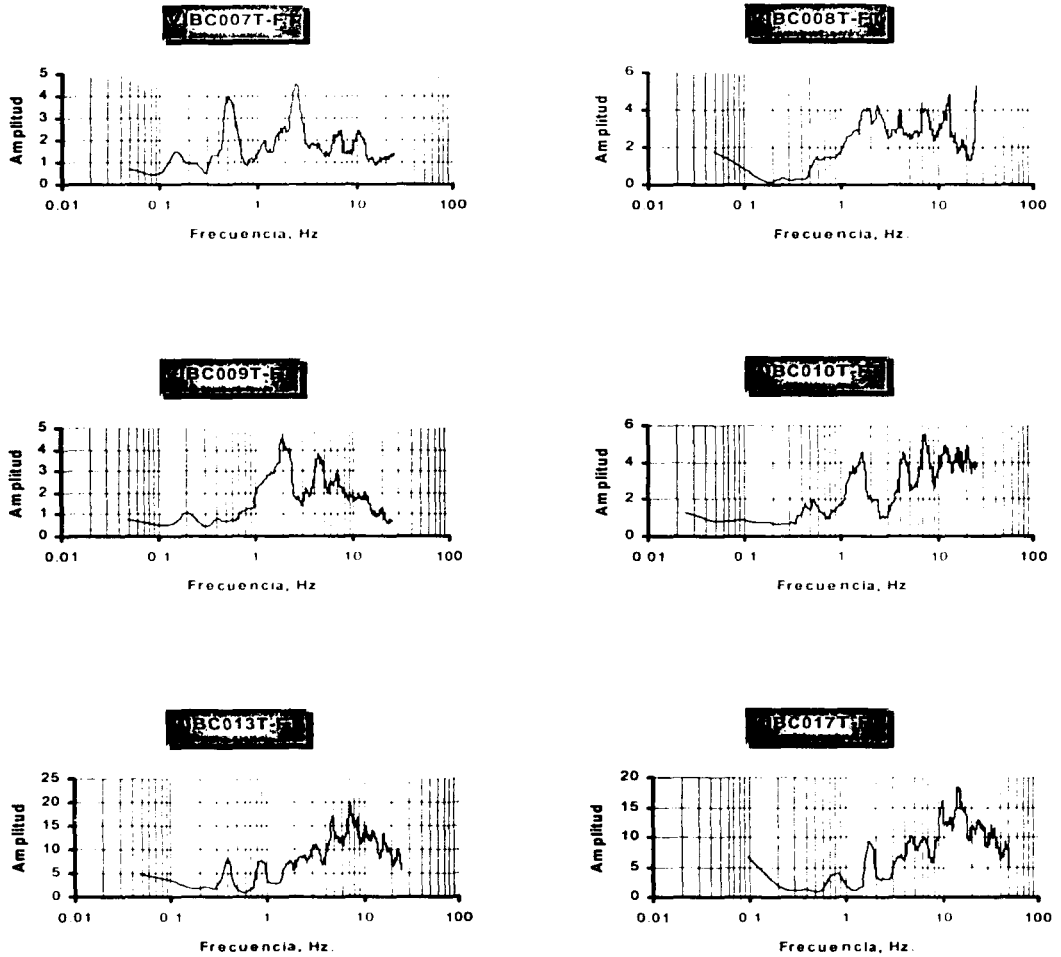


Figura 3.6 Funciones de Transferencia de la base a la corona de la Presa

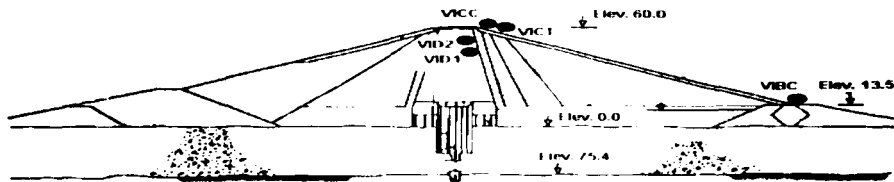
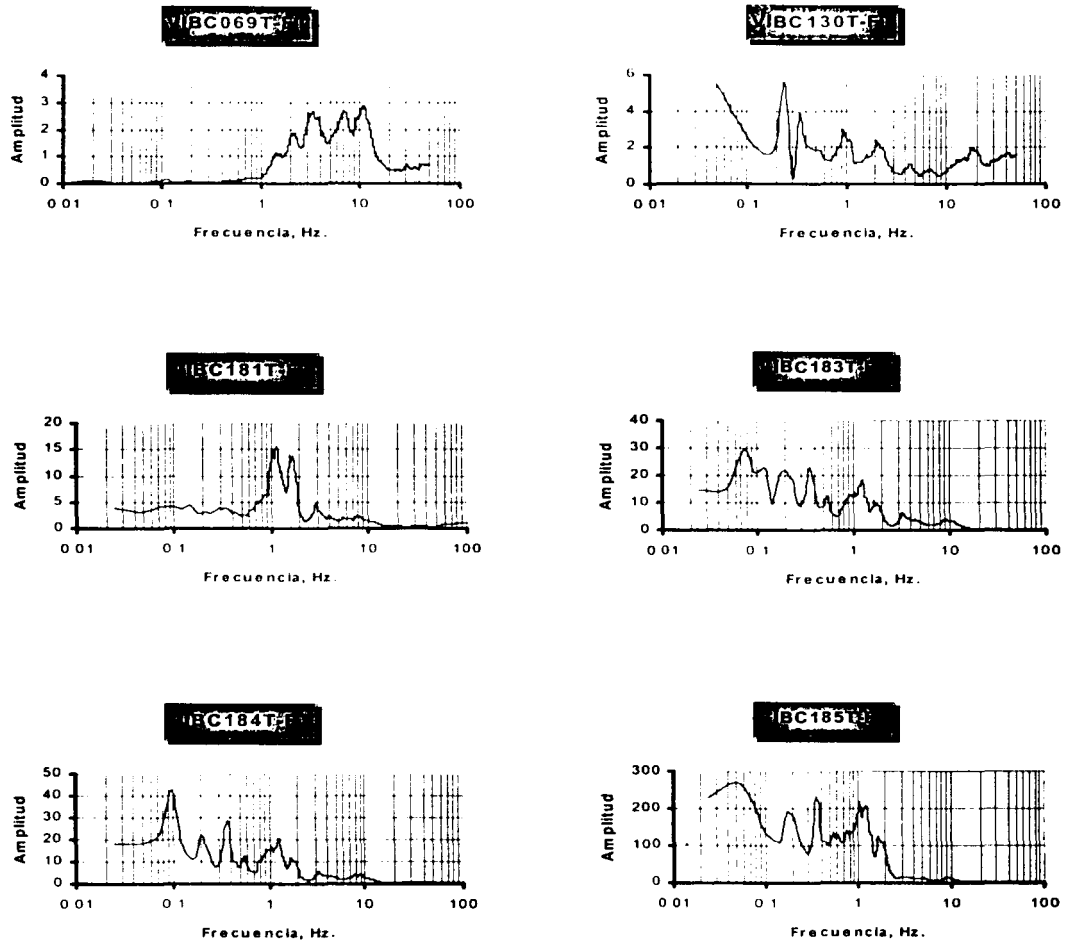


Figura 3.6 Funciones de Transferencia de la base a la corona de la Presa

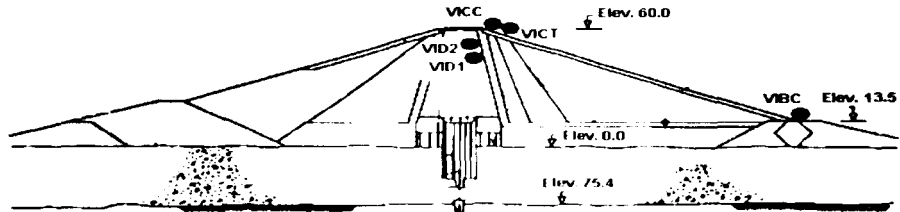
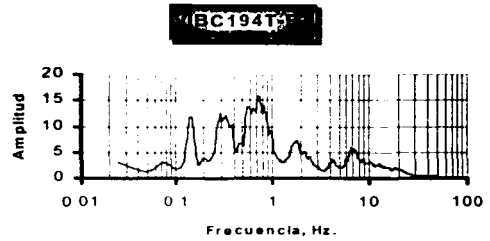
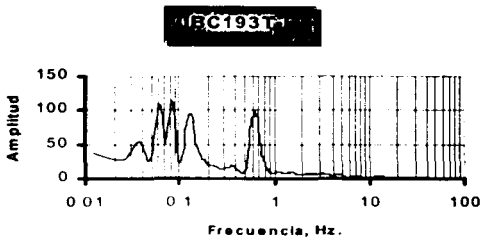
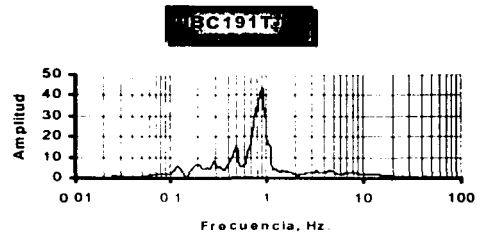
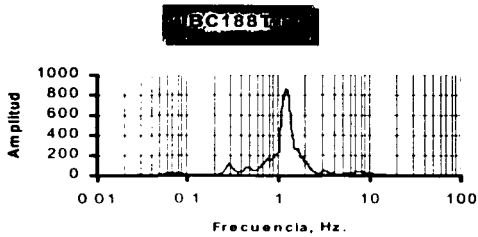
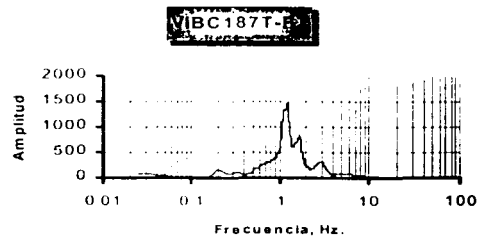
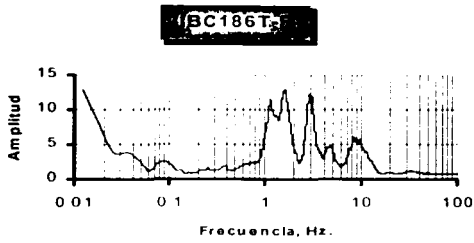


Figura 3.6 Funciones de Transferencia de la base a la corona de la Presa

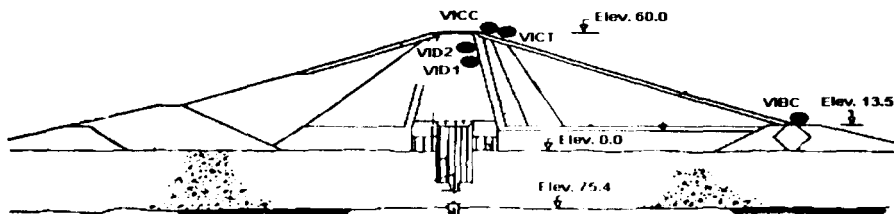
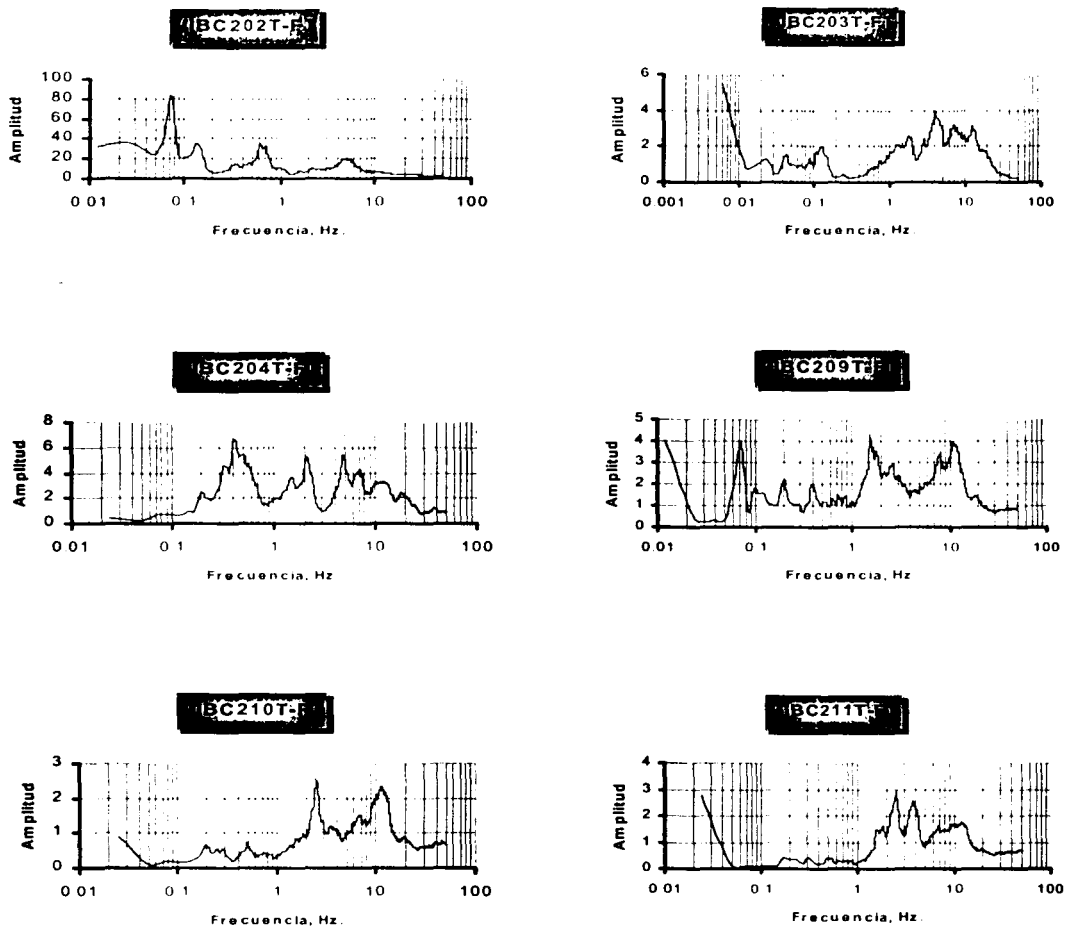


Figura 3.6 Funciones de Transferencia de la base a la corona de la Presa

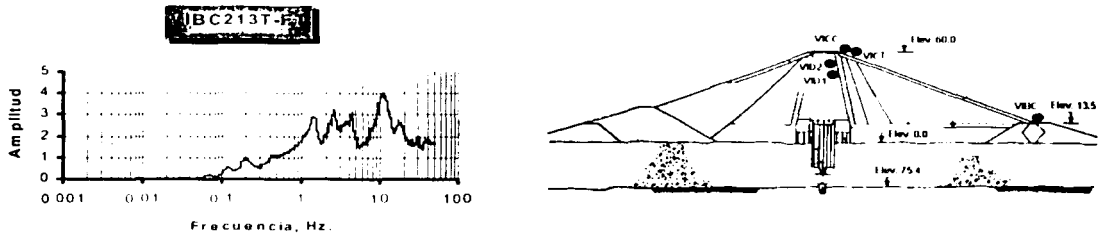


Figura 3.6 Funciones de Transferencia de la base a la corona de la Presa

Las funciones de transferencia se dibujaron en la Figura 3.6. La frecuencia en la que se presentan las mayores amplificaciones aumenta ligeramente a medida que aumenta la magnitud del sismo por ejemplo. En el sismo de 31 de Mayo de 1990 con Magnitud de 5.9 la frecuencia fue de 1.32 Hz., mientras que para el sismo del 9 de Octubre de 1995 con Magnitud de 7.9 la frecuencia fue de 1.51Hz.

La forma de vibrar de la cortina, calculada a partir de los registros obtenidos de las estaciones acelerográficas de la base y de la corona, muestran frecuencias que van desde 1.32 a 2.87 Hz. Las variaciones pueden ser debido a la magnitud del sismo, profundidad focal o distancia del epicentro a la presa. Los valores bajos corresponden a las funciones de transferencia considerando el registro de la estación acelerográfica corona centro por lo que valores de amplitud para frecuencias menores a 0.1 Hz se deben a que en estos registros de mediciones con aparato no se utilizaron filtros confiables. Y los valores arriba de 2 Hz, Corresponden a los valores calculados con los registros de la estación de la corona testigo, siendo estos más confiables que los primeros.

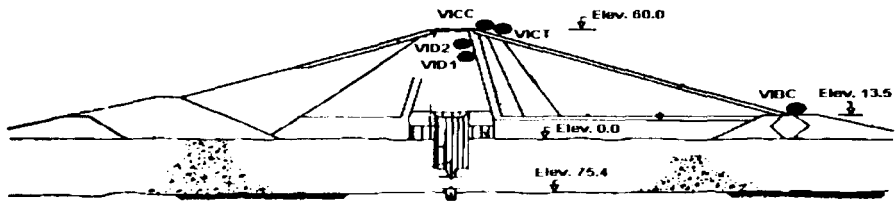
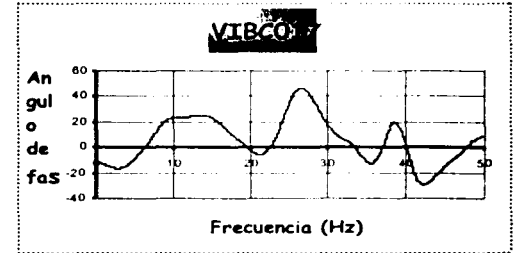
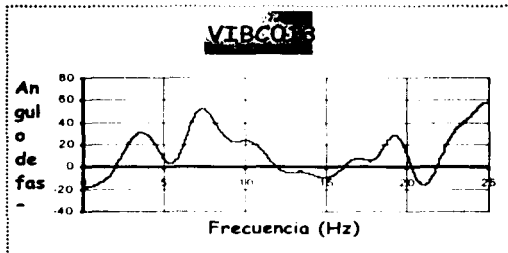
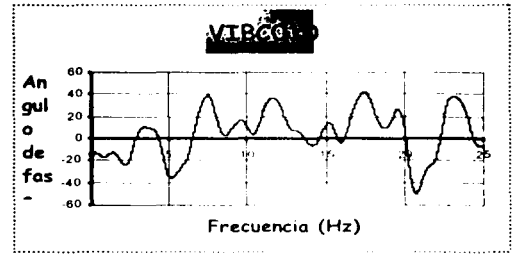
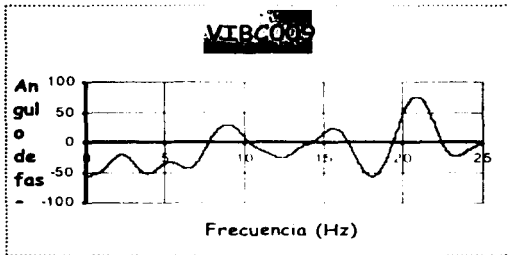
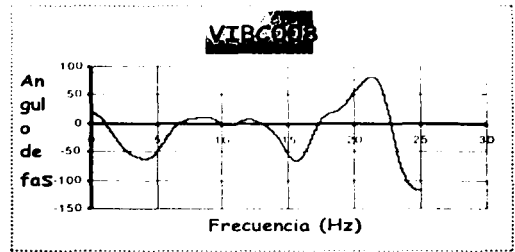
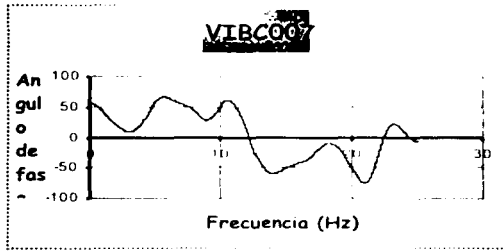


Figura 3.7 Ángulos de fase de la base a la corona de la presa

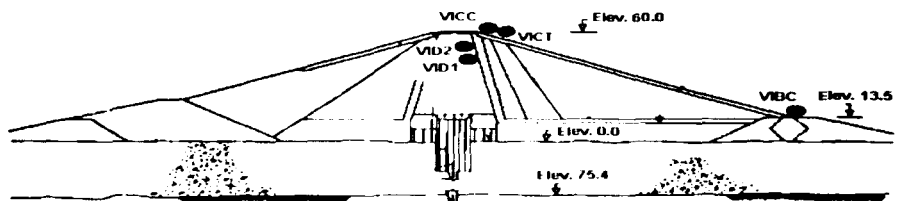
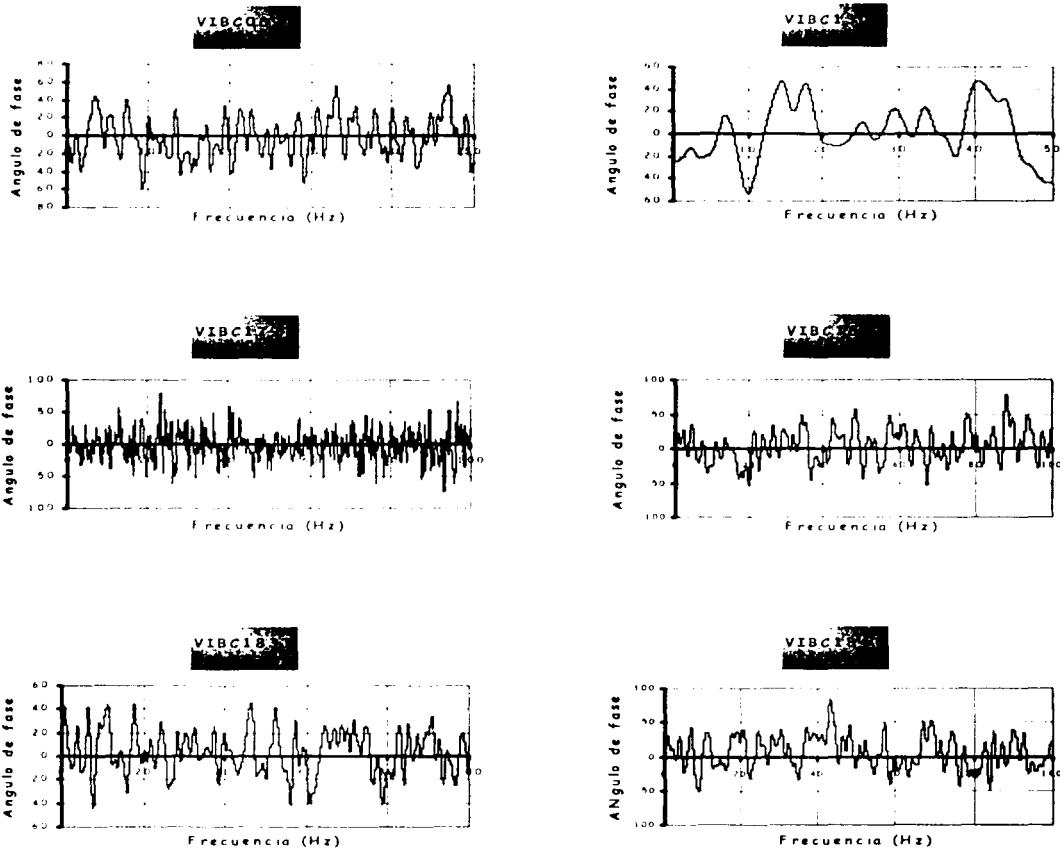


Figura 3.7 Ángulos de fase de la base a la corona de la presa

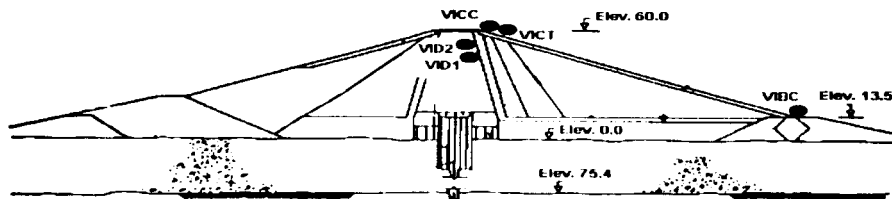
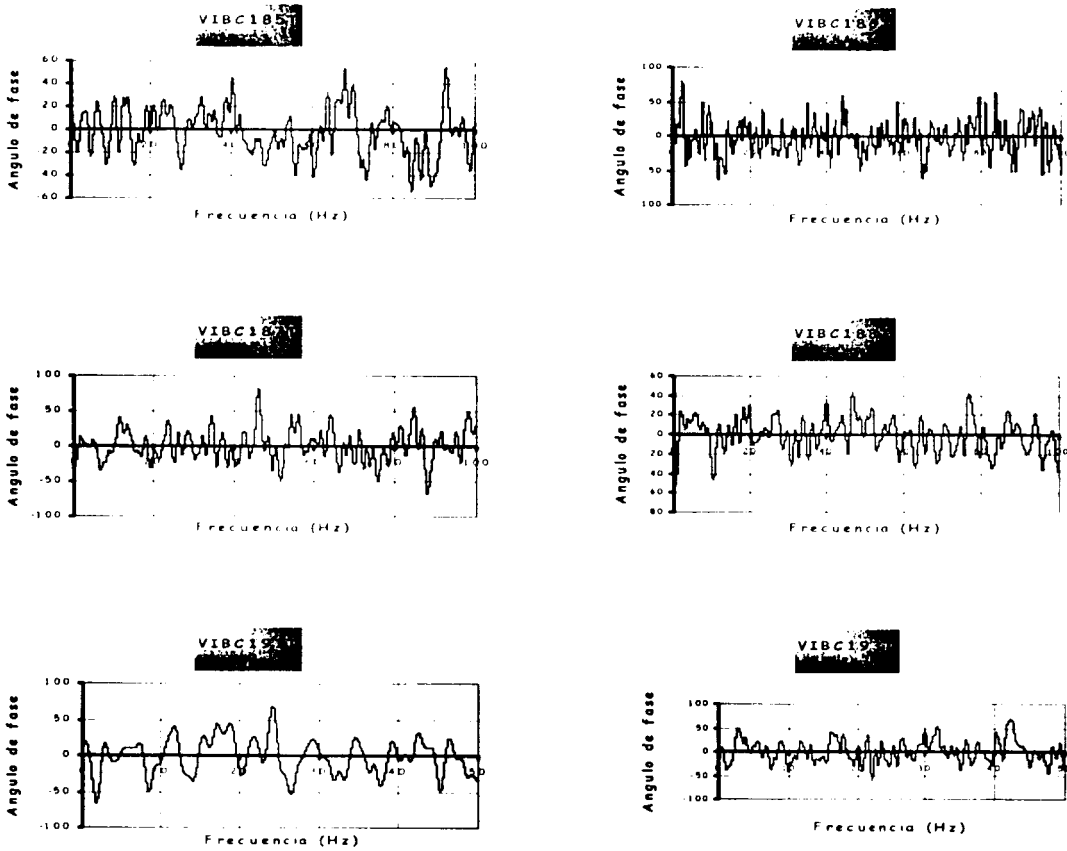


Figura 3.7 Ángulos de fase de la base a la corona de la presa

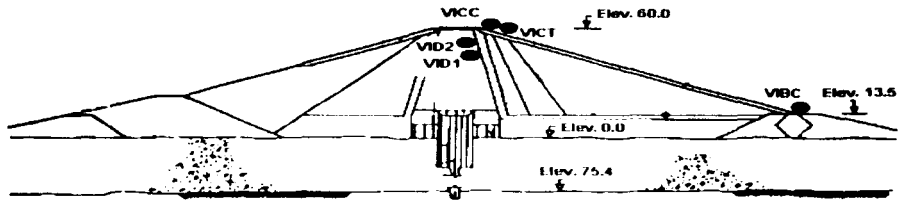
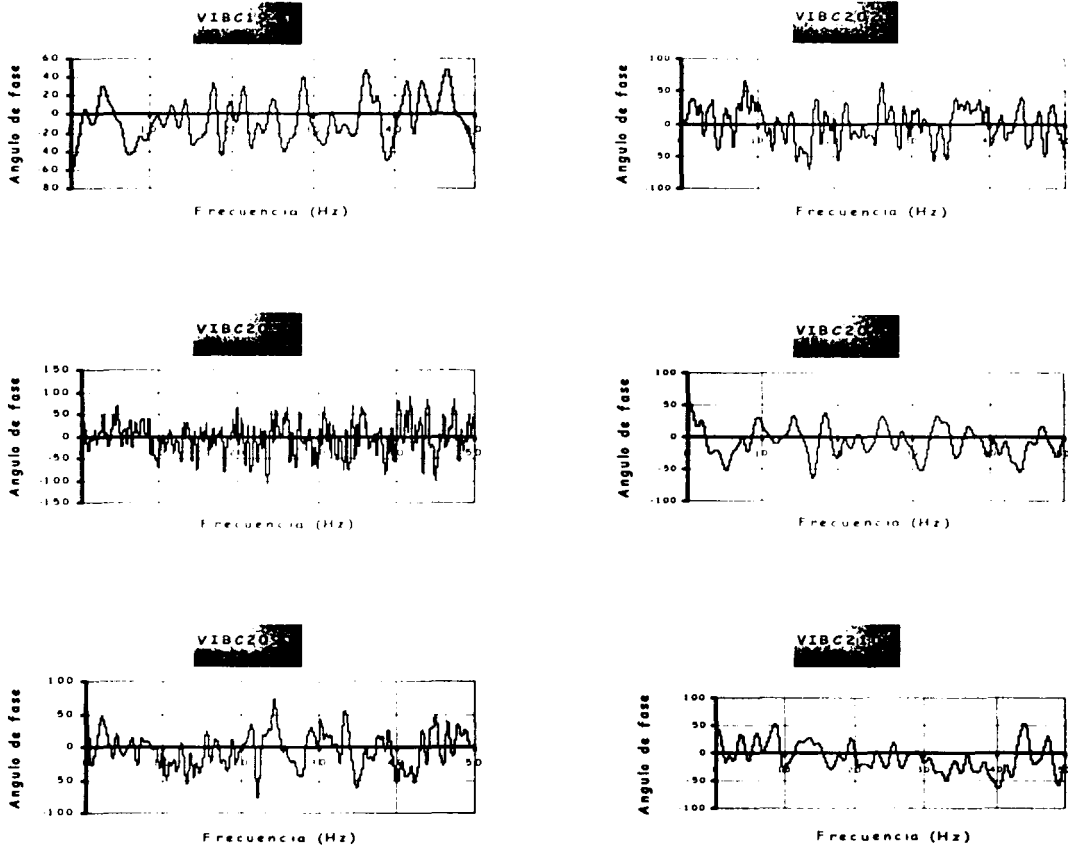


Figura 3.7 Ángulos de fase de la base a la corona de la presa

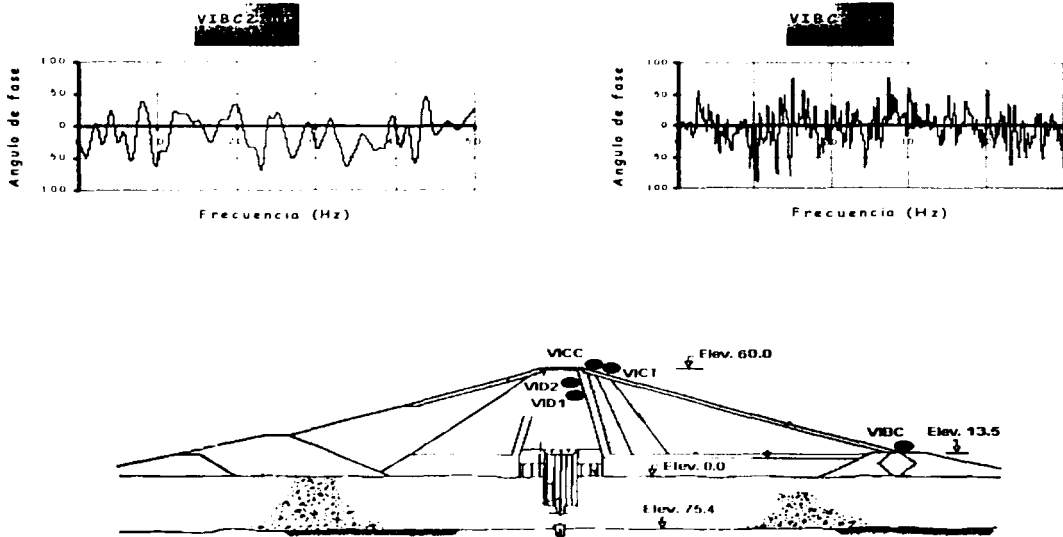


Figura 3.7 Ángulos de fase de la base a la corona de la presa

Las curvas de los ángulos de fase presentan concentraciones de valores con cambios de signo en frecuencia mayores a 3 Hz para los sismos de mayor magnitud mientras que para los de menor magnitud las curvas son menos densas. Los mayores ángulos de fase se presentan con los sismos de mayor magnitud, principalmente en frecuencias arriba de 2 Hz, para el rango de frecuencias de 1 a 2 Hz los valores de los ángulos de fase son menores a 60° .

Al ser semejantes los valores, variaciones y formas de las funciones de coherencia y el ángulo de fase entre las frecuencias de 1 a 2 Hz, es indicativo de que la cortina ante todos los sismos tuvo el mismo comportamiento. Esta situación se corrobora con las frecuencias de vibración de la cortina para varios sismos (1.32 Hz).

CONCLUSIONES:

1.- El comportamiento sísmico de la presa José Ma. Morelos ha mostrado que los temblores fuertes actuando sobre presas de tierra modernas son capaces de producir deformaciones permanentes que no resultan despreciables si se comparan con las registradas durante la construcción, primer llenado del embalse, o décadas de operación normal después del llenado. Será necesario únicamente tomar en cuenta esta experiencia hasta el punto de admitir que los sismos más fuertes serán los más dañinos y así concluir que ningún terraplén alto se debe considerar esencialmente seguro contra temblores. Por tanto todas las presas importantes en zonas sísmicas se deben diseñar claramente a prueba de daños por temblores.

2.- Para cada presa parece existir un principio de la aceleración de excitación en roca y de la aceleración máxima de respuesta, abajo del cual no se desarrolla ningún daño apreciable ni deformaciones permanentes.

3.- La presa José Ma. Morelos ha sufrido asentamientos y desplazamientos que aumentan significativamente al ocurrir un sismo importante. Si bien la magnitud de las deformaciones es moderada, su tendencia y secuencias apuntan hacia una gradual pérdida de la sección de las cortinas y una paulatina degradación de la estructura, debido a la acción repetida de los sismos que afectan al sitio de la cortina; sin embargo, no pone en peligro la estabilidad de la cortina.

4.- A pesar de que se cuenta con abundante instrumentación sísmológica en la presa José Ma. Morelos, la información obtenida con ella resulta insuficiente, especialmente para sismos de gran magnitud en los cuales los instrumentos han

presentado problemas y se cuenta con pocos registros obtenidos en el cuerpo de la presa y en las laderas. Para obtener un mejor conocimiento del comportamiento es conveniente que en las presas, en general, exista un gran número de acelerógrafos, estratégicamente distribuidos, para registrar los movimientos sísmicos en la cortina y en las márgenes, pues con más puntos de medición se puede mejorar el conocimiento sobre la respuesta sísmica de la presa y, por tanto, afinar los modelos de comportamiento sísmico.

5.- Las aceleraciones máximas en las tres componentes de todas las estaciones de la cortina corresponden a las producidas por el sismo de enero de 1997, y particularmente en la estación de la corona se registró una aceleración de 625 cm/s^2 en la componente transversal, este valor de aceleración máxima es ligeramente menor que el producido por el sismo de septiembre de 1985 (696 cm/s^2). Sin embargo habrá que considerar que la caseta que aloja el instrumento sufre desplazamientos intermitentes respecto a la cortina, que producen aceleraciones pico no representativas de la respuesta de la cortina. Esto se refleja en pulsos agudos y de alta frecuencia en los acelerogramas disponibles.

6.- En los sismos del 31 de Mayo de 1990 y del 12 de Febrero de 1992 de magnitudes menores que 6, se puede observar que las aceleraciones registradas con las estaciones de la corona y la testigo son muy similares entre sí en magnitud; sin embargo, sismos de mayor magnitud podrían generar los movimientos relativos entre la caseta y la cortina y por tanto aceleraciones diferentes.

7.- Las aceleraciones máximas de la componente transversal son mayores que las de las componentes longitudinal y vertical.

8.- Los datos proporcionados por los inclinómetros instalados en el corazón impermeable de la cortina indican que la presa se comporta diferente en el cadenamiento 0+000 a 0+270 y del 0+270 a 0+490, debido a que entre la primera y la segunda etapa de construcción se colocó una franja de arcilla de alta plasticidad de 2 m de espesor. Mientras que los movimientos dinámicos indican que la respuesta de la cortina entre las dos etapas constructivas es relativamente la misma. Debe tenerse en cuenta que los acelerógrafos de la base y los de la corona de la cortina se desplantaron sobre el enrocamiento.

9.- La función de transferencia calculada con el registro del acelerógrafo de la corona centro tiene fuertes amplificaciones en frecuencias mayores a 10 Hz, debido a los movimientos relativos entre la cortina y la caseta de esta estación acelerográfica.

10.- La frecuencia característica encontrada en todas las funciones de transferencia es de 1.32 Hz, resultado que coincide con trabajos anteriores; sin embargo, estos resultados no son estrictamente concluyentes, en el sentido de cambios en esta frecuencia por efectos no lineales, debido a que aún se cuenta con poca información con respecto a sismos fuertes.

11.- Las funciones de coherencia muestran valores menores a 0.8 y con algunos valores aislados iguales a la unidad, principalmente en los sismos de mayor magnitud.

12.- Al ser semejantes los valores, variaciones y formas de las funciones de coherencia y el ángulo de fase entre las frecuencias de 1 a 2 Hz, es indicativo de que la cortina ante todos los sismos tuvo un comportamiento similar. Esta situación se corrobora con las frecuencias de vibración de la cortina para varios sismos (1.32 Hz).

13.- A pesar de que los sismos analizados han llegado a la presa José Ma. Morelos con diferente intensidad, directividad y distancia epicentral, la respuesta de la cortina ha sido similar, por lo que se puede concluir que esta no depende significativamente de los parámetros propios de los sismos. Es factible que el estrato de aluvión sobre el que se desplanta la presa contribuya de manera importante a uniformar las características del movimiento provocado por cada evento en la cortina.

14.- Ya que los temblores fuertes en presas de tierra son eventos relativamente raros y además ofrecen excelentes oportunidades para calibrar métodos de análisis y diseño, la instrumentación sísmica resulta en extremo necesaria en presas de este tipo localizadas en zonas sísmicas. Por las mismas razones es recomendable tratar de mejorar la confiabilidad de la instrumentación.

BIBLIOGRAFÍA:

- Alcántara L., Javier c., (1993), "Análisis de los registros obtenidos en las estaciones acelerográficas Villita Corona y Villita testigo", Memorias de x Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México.
- Ambraseys N. N., (1960), " On the Seismic Behavior of Earth Dams", *Geotechnique*, Vol. 18, No.3, pag.181-213.
- Ambraseys N. N., Sarma S. K., (1967), " The response of Earth Dams to Strong Earthquakes", *Proceedings II World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 1, Tokio, pag.331-356.
- CFE, (1980), "Comportamiento de las Presas El Infiernillo y La Villita incluido el sismo de Marzo 14, 1979", CFE, México.
- CFE, (1985), "Comportamiento de las Presas Construidas en México", *Contribución al XV Congreso Internacional de Grandes Presas*, Vol. 2, Lousanne, Suiza.
- Clough R. W., (1961), "Dinamic Effects of Earthquakes", *Trans, ASCE*, Vol. 126, Parte II, pag. 847-876.
- Figueroa J., (1970) "Catálogo de sismos ocurridos en la República Mexicana actualizados hasta 1983", *Publicación Núm. 272 del Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D. F.*
- Gazetas G., Debchaudhury A., Gasparini D. A., (1981), "Random Vibration Analysis for the Seismic Response of the Earth Dams", *Geotechnique* 31, No. 2, pag. 261-277.
- González Mireles S. (1997), "C. H. La Villita Mich. Presa José Ma. Morelos, Reporte de Mediciones". Informe 841.01-057/97, México, D.F. CFE-GIEC.

- Gutenberg B. y Richter C. F., (1954), "Seismicity of the Earth", Pricenton Press, Pricenton, N. J., U. S. A.
- Hernández Reginaldo, (1989), "Respuesta Dinámica en las Presas en boquilla Triangular", Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D. F.
- Hernández Reginaldo, (1994), "ANESSE: Programa para el análisis espectral de señales", Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Hernández Reginaldo, (2000), "Comportamiento Sísmico de Presas de Tierra a partir de Prototipos", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D. F.
- León J.L. (1979), "Análisis del comportamiento de la presa La Villita ante dos sismos. Primera Etapa", Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Comisión Federal de Electricidad, México, D.F.
- Marsal, R. J. y Reséndiz N. D., (1983), "Presas de Tierra y Enrocamiento", Editorial Limusa, México, D.F.
- Mejía L., Seed H.B., Lysmer J., (1982), "Dynamic Análisis of Earth Dams in Three Dimensions", J.G.E.D., ASCE, Vol. 108, No. GT12, pag. 1586-1604.
- Mejía L., Seed H.B., (1983), "Comparison of 2-D and 3-D Dynamic Analysis of Earth Dams", J.G.E.D., ASCE, Vol. 109, No. 11, pag. 1383-1398.
- Mononabe N., Tanaka A., Matsumara M., (1936), "Seismic Stability of the Earth Dams, Memorias II" , Congreso Internacional de Grandes Presas, Washington.
- Newland D.E., (1983), "Vibraciones Aleatorias y Análisis Espectral", Editorial A.C., Madrid.

- Newmark N. M., (1965) "Effects of Earthquakes on Dams and Embankment", *Geotechnique*, Vol. 15, No. 2, pag. 139-173.
- Prince J., Chávez G., (1986) "Estudio de los pulsos en los acelerogramas registrados en la corona de La Villita", *Informa Proyecto 4706*, Instituto de Ingeniería, México.
- Reséndiz D., Rosenblueth E., Mendoza E. (1972) "Diseño Sísmico de Presas de Tierra y Enrocamiento, Estado del Arte", Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe interno No. 300, México.
- Reséndiz D., Romo M.P., (1972), "Análisis of Embankment Deformations", *Proc of the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structure*, Purdue, Ind., pag. 817-836.
- Robson J.D., (1963), "An introduction to Random Vibration" University of Edinburgh.
- Romo M.P., Macedo G., (1986), "Comportamiento Dinámico de la Presa La Villita", *Sismos de 1985: Casos de Mecánica de Suelos*, Septiembre de 1986, México, D. F.
- Romo M.P., Ayala G., Reséndiz D., Díaz C., (1980), " Respuesta Dinámica de las Presas El Infiernillo y La Villita", *Comportamiento de las Presas El Infiernillo y la Villita incluido el sismo de Marzo 14, 1979*, CFE, México.
- Romo M. P., Magaña R. T., Hernández R. Reginaldo., (1990), "Efecto Tridimensional en la Respuesta Sísmica de Presas", *Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, San Luis Potosí, Vol. II.
- Romo M. P., Flores R., (1991), "Análisis de la Respuesta sísmica de Presas de Tierra: Experiencias en México", *IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones*, Viña del Mar, Chile, pag. 1257-1278.

- Romo M.P.,Hernández Reginaldo.,(1992), "Comportamiento Dinámico de Presas", Reporte del Instituto de Ingeniería a la Comisión Federal de Electricidad.
- Romo M. P., Magaña R. T., Hernández R. Reginaldo., (1990), "Seismic Response Analisis of El Infiernillo and La Villita Dams", Volumen Marsal, México, D.F.
- Sarma S. K., (1975), "Seismic Stability of Earth Dams and Embankments", *Geotechnique*, Vol. 25, No. 4, pag. 743-761.
- Seed, H.B., Idriss I.M. y Kiefer, F.M., (1969), "Characteristics of Rock Motion During Earthquakes", *J.S.M.F.D., ASCE*, Vol. 95, No. SM5.
- Seed, H.B., Duncan, J.M. e Idriss I.M., (1975), "Criteria and Methods For Estatic and Dynamic Analysis of Earth Dams", In *Criteria and Assumption for Numerical Analysis of Dams*, Swansea, University College, Pag. 564-588.
- SRH-CFE-UNAM (1976), "Comportamiento de Presas Construidas en México", Contribución al XII Congreso Internacional de Grandes Presas, México.