



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL, TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA.

ANÁLISIS DINÁMICO DE LA PRESA JOSÉ
MARIA MORELOS, CONSIDERANDO LA
COMPONENTE LONGITUDINAL DE LOS
MOVIMIENTOS.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

GASTÓN ANTONIO SANTIZO OLARIA

DIRECTOR: M.I. REGINALDO JOSÉ HERNÁNDEZ ROMERO



MÉXICO, D.F.

2004



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.

ESTÁ TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/009/04

Señor
GASTÓN ANTONIO SANTIZO OLARIA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. REGINALDO 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 "
CONSIDERANDO LA COMPONENTE TRANSVERSAL DE LOS MOVIMIENTOS.**

- INTRODUCCIÓN
- I. GENERALIDADES
- II. SISMICIDAD
- III. MÉTODOS DE ANÁLISIS
- IV. ANÁLISIS DINÁMICO
- V. 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 HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 16 de Febrero del 2004.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/crc.

A mi madre

Por que a pesar de todas las dificultades siempre supiste guiarme y todo tu apoyo, cariño y comprensión siempre me alentaron para culminar esta etapa, gracias.

A mi yaya

Por todo el amor que te tengo y sobretodo porque siempre te has preocupado por mi.

A mi tía Montserrat

Por todo el apoyo y cariño que siempre me ofreciste.

A mi hermana

Por el invaluable amor que siento por ti y el valioso apoyo incondicional que siempre me has brindado.

A mi padre

Por tu insistencia y apoyo que me sirvieron mucho para culminar este trabajo, gracias.

A mi esposa

Por todo lo que te amo y por la paciencia y comprensión que me tuviste durante mucho tiempo, además me enseñaste que la perseverancia es un valor único. Nunca hay que rendirse.

A toyo

Por tu incomparable amistad. Todos tus consejos me orientaron mucho y tu apoyo incondicional fue parte esencial de este logro, quiero que te sientas parte de este triunfo y que lo disfrutes tanto como yo.

A mis suegros

Por el cariño, nobleza y buena onda que han tenido conmigo.

A mis amigos

Por ayudarme a culminar este ciclo, por los momentos que he pasado con ustedes y por el simple hecho de brindarme su amistad.

A la UNAM

Por haberme dado la oportunidad de pertenecer a ella.

A la Comisión Federal de Electricidad

Por todo el apoyo brindado.

A mis profesores durante la carrera

Por su esfuerzo y porque de ellos adquirí los conocimientos, que me servirán como herramienta para desarrollar esta profesión, gracias.

Al M. I. Reginaldo José Hernández Romero

Por haberme cedido tu tiempo durante la elaboración de este trabajo, por todo el apoyo que me brindaste y por haberte portado como un amigo durante este periodo, gracias.



INTRODUCCIÓN.....	1
--------------------------	----------

Capítulo I

Generalidades.....	3
1.1 Información general de la zona en estudio.....	3
1.1.1 Descripción de la cuenca.....	3
1.1.2 Descripción del medio natural.....	4
1.1.3 Hidrología y usos del agua.....	5
1.1.4 Descripción del medio social.....	6
1.1.5 Estructura económica.....	6
1.2 Ubicación de la Central Hidroeléctrica "La Villita".....	8
1.3 Geología.....	8
1.4 Descripción de la presa.....	10
1.5 Sismicidad.....	11
1.5.1 Movimiento de convección y deriva continental.....	13
1.5.2 Tectónica de placas.....	14
1.5.3 Subducción.....	15
1.5.4 Origen de los sismos.....	15
1.5.5 Magnitud e intensidad sísmica.....	16
1.5.6 Sismicidad y vulcanismo en México.....	17
1.6 Instrumentación sísmica.....	19
1.7 Instrumentación geotécnica.....	21

Capítulo II

Sismicidad.....	23
2.1 Estadísticas de los sismos registrados.....	24
2.1.1 Distribución en mapa.....	24
2.2.2 Magnitud.....	30
2.2.3 Aceleración en roca.....	38
2.2 Espectros de respuesta de los sismos registrados en roca.....	55

Capítulo III

Métodos de análisis.....	69
3.1 Transformada de Fourier.....	69
3.2 Correlaciones.....	72



Capítulo IV

Análisis dinámico.....	78
4.1 Funciones de transferencia.....	78
4.2 Ángulos de fase.....	96
4.3 Funciones de coherencia.....	113
4.4 Tiempo de retardo.....	129

Capítulo V

Conclusiones.....	146
-------------------	-----

Bibliografía



1 - INTRODUCCIÓN

El ingeniero siempre se ha preocupado por realizar obras de calidad que mantengan un funcionamiento adecuado durante toda su vida útil, bajo este tenor nació y se incremento durante las últimas décadas la necesidad de estudiar la respuesta dinámica de presas, motivado principalmente por la observación de decenas de estas obras falladas al ser sometidas a excitaciones sísmicas y por los casos donde sólo sufren daños menores como consecuencia de eventos sísmicos de baja intensidad, pero que quedan susceptibles al colapso total si posteriormente ocurre un sismo de mayor intensidad.

El objetivo perseguido al incrementar este tipo de información es desarrollar métodos de análisis que permitan representar de manera más objetiva los factores involucrados en el comportamiento dinámico de presas, tales como: la geometría de la boquilla, la distribución y el comportamiento no lineal de los materiales (Mejía, 1983), y las características de la excitación considerando la magnitud, la profundidad focal, la directividad y la distancia epicentral. Actualmente, la utilización de estos métodos en el diseño de presas permite analizar varias alternativas antes de determinar la configuración final de una cortina.

Particularmente la presa José María Morelos junto con su Central Hidroeléctrica "La Villita", se ubican dentro de un ambiente altamente sísmico, por lo cual han sido sometidas desde su construcción a cargas dinámicas de diferente magnitud, razón que provocó el interés de analizar su comportamiento ante este tipo de eventos.

En este trabajo se evalúa el comportamiento dinámico que ha presentado la cortina de la presa José María Morelos mediante un análisis que implica la técnica de vibraciones aleatorias, a partir del cual se obtienen las características de vibración de la estructura a través del cálculo de funciones de transferencia, ángulos de fase, funciones de coherencia, tiempos de retorno y espectros de respuesta. Todos ellos determinados a partir de los registros hechos por la instrumentación instalada en la cortina de la presa para la captación de los sismos ocurridos en la zona.

En el capítulo I se encuentran descritas las características generales tanto de la zona de estudio como de la presa José María Morelos, incluyendo información sobre la cuenca del Río Balsas, los usos del agua, la ubicación de la cortina, la geología de la boquilla, la distribución y tipo de materiales, el conjunto presa – Central Hidroeléctrica, la instrumentación instalada y un panorama general sobre sismos que detalla la actividad sísmica de la zona.

En el capítulo II se presentan las características principales de cada uno de los fenómenos sísmicos considerados para la realización de este análisis. Se pueden encontrar datos como: las coordenadas geográficas epicentrales, la magnitud, la distancia epicentral, la profundidad focal y las aceleraciones máximas registradas en cada uno de los acelerógrafos instalados en la presa. También se incluyen algunos detalles de los sismos más importantes que se han registrado y los espectros de respuesta obtenidos a partir de los registros realizados por los equipos de monitoreo.

El capítulo III incluye los procedimientos analíticos utilizados para evaluar la respuesta dinámica inducida en presas por eventos sísmicos de diferente magnitud.



Introducción

Dentro del capítulo IV se concentraron todas las características de vibración de la cortina, incluyendo los valores de la función de transferencia, ángulos de fase, funciones de coherencia y tiempos de retardo, obtenidos a partir de los registros elaborados por los acelerógrafos instalados en la cortina.

Finalmente las conclusiones obtenidas a partir del análisis hecho en los capítulos 2 a 4 se manifiestan en el capítulo V.



1 - GENERALIDADES

1.1 – INFORMACIÓN GENERAL DE LA ZONA EN ESTUDIO

Michoacán, por su ubicación geográfica, es uno de los estados de la República Mexicana que cuenta con mayores e importantes recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, siendo los primeros los más abundantes y los que más se aprovechan. El estado forma parte de cuatro regiones hidrológicas: en la porción norte del estado se localiza la región "Lerma-Chapala-Santiago" (N° 12); la del "Río Balsas" (N° 18) está situada en la porción central, y en la sierra de Coalcomán, zona costera del sur, están ubicadas las regiones "Armería-Coahuayana" (N° 16) y "Costa de Michoacán" (N° 17), (INEGI, 1995).

La zona de interés para el desarrollo de este trabajo esta situada dentro de la región hidrológica del "Río Balsas", superficie donde se localiza la cuenca del mismo nombre y en la cual quedo constituida una de las corrientes más importantes del país, el Río Balsas, conocido también como Atoyac, Grande o Mezcala, que por su cercanía con la zona metropolitana de la ciudad de México ha sido aprovechado desde hace muchos años para la generación de energía eléctrica.

Entre las plantas generadoras más importantes, por aprovechar reiteradamente (en cascada) los escurrimientos de la mayor parte de su cuenca, se tiene la Central y presa Ing. Carlos Ramírez Ulloa, en operación comercial desde el 16 de diciembre de 1986, aguas abajo de ésta, se encuentra la Central El Infiernillo, asociada al vaso de la presa Adolfo López Mateos, que inicio a producir energía el 28 de enero de 1965, y concluyendo el aprovechamiento de este sistema, se encuentra la presa José María Morelos, construida sobre el Río Balsas a sólo 15 Km de su desembocadura en el Océano Pacífico, y que entró en operación, con fines de riego agrícola, en 1968 tras cuatro años de construcción, e inicio la producción de energía eléctrica el 19 de enero de 1973 con la Central Hidroeléctrica "La Villita".

1.1.1 - DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La cuenca del Río Balsas es una de las más importantes de la República Mexicana, se localiza en la zona centro del país y cubre un área de aproximadamente 111 300 km² hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

Esta formada por las porciones de los estados de Veracruz, Puebla, Oaxaca, Michoacán, Guerrero, Jalisco, Tlaxcala, Distrito Federal y todo el Estado de Morelos. El parteaguas esta delimitado en la parte norte por la faja volcánica transmexicana, desde el cerro de la Malinche hasta el límite con los estados de Jalisco y Michoacán, por el este la cuenca se limita por la Sierra Madre de Oaxaca y al sur y el oeste por la Sierra Madre del Sur, posición que le confiere a su territorio un relieve sumamente accidentado, en el cual domina el terreno montañoso alternado con profundas depresiones. Queda comprendida entre los meridianos 97°30' y 103°15' de longitud oeste y paralelos 17°00' y 20°05' de latitud norte.

Cuenta con una variedad de climas que van desde semi-seco con el invierno y seco en primavera, cálido sin estación invernal como el de la tierra caliente de Guerrero y Michoacán, hasta los climas fríos y húmedos que presentan las faldas de la sierra nevada, todos estos fenómenos son producto de los sistemas montañosos y las precipitaciones en la cuenca.



Capítulo I - Generalidades

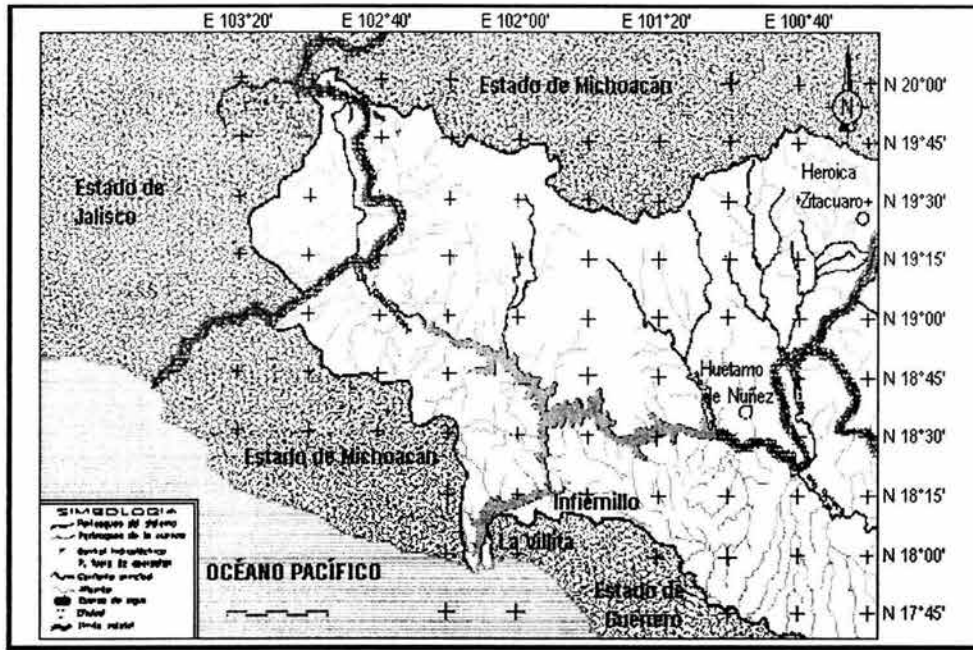
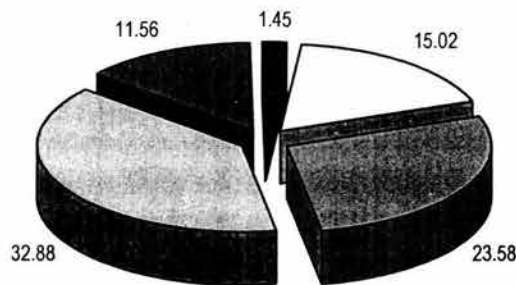


Figura 1.1 - Cuenca baja del Río Balsas

1.1.2 - DESCRIPCIÓN DEL MEDIO NATURAL

El medio fisiográfico de la región en estudio se localiza en los límites de la Sierra Madre del Sur con la planicie costera del Pacífico, su relieve presenta lomeríos con pendientes y alturas bajas expuestas a modificación debido al proceso fisiográfico de la zona costera, en función de los movimientos tectónicos que generan elevaciones o hundimientos.

Según la clasificación de la FAO (Dudal, 1968) para los suelos de la República Mexicana, en el área de estudio existen cinco tipos de suelo, siendo el más abundante el feozem que ocupa el 32,88 % del área y el de menor cobertura el cambisol con tan sólo 1,45 % del total (Gráfica 1).



□ Feozem 32,88 ■ Regosol 11,56 ■ Cambisol 1,45 □ Luvisol 15,02 ■ Fluvisol

Gráfica 1.1 - Tipos de suelo en el área analizada

El clima de la zona de acuerdo con el sistema de Köppen (1948) es Aw1, definido como cálido subhúmedo con lluvias en verano y con una temperatura media anual superior a los 20°C.



1.1.3 - HIDROLOGÍA Y USOS DEL AGUA

El Río Balsas, principal afluente, nace a grandes altitudes en las laderas de los volcanes Nevado de Toluca, Popocatepetl, Iztaczihuatl y Malinche y delimita hacia el final de su recorrido a los estados de Guerrero y Michoacán, es uno de los ríos con mayor potencial hidroeléctrico en el país, ya que existen grandes desniveles a lo largo de su curso, aunado el volumen medio anual de 13 507 millones de m³ que escurre hasta su desembocadura. Cuenta entre sus afluentes más destacados a los ríos Tepalcatepec, Cutzamala, Tacámbaro o Carácuaro, Placeres del Oro y Cuitzio. El agua del Río Balsas y en especial la de la presa José María Morelos es utilizada en varias actividades de la población dentro del área de estudio, en este punto se definen los principales usos del agua.

Abastecimiento público

La mayoría de las poblaciones dentro del área de estudio se abastecen de agua de manantial, aunque las poblaciones de mayor tamaño como las de Lázaro Cárdenas y Guacamayas, son abastecidas por redes de tubería de agua potable, esto después de tomar el agua de pozos y conducirla a la planta potabilizadora de Lázaro Cárdenas.

Hidroeléctrico

El potencial hidroeléctrico del Río Balsas es aprovechado por última vez para la generación de energía eléctrica, casi en su desembocadura en el Océano Pacífico mediante la Central Hidroeléctrica "La Villita", obteniendo una generación media anual de 1 165.71 GWh, para el periodo 1973 - 2000.

Transporte de desechos

No existen descargas de ningún tipo en la zona del embalse; sin embargo, aguas abajo de la presa se encuentran pequeños ductos que descargan agua residual de tipo doméstico sobre el Río Balsas (figura 1.2), además los poblados cercanos a la playa descargan sus aguas residuales directamente en el mar.

Industrial

El suministro de agua en bloque al Distrito Industrial Marítimo de Lázaro Cárdenas, Michoacán (figura 1.3), es administrado por la CNA y lo realiza mediante la operación de un acueducto desde julio de 1987, el agua es tomada del Río Balsas y requiere de una ligera purificación para su uso industrial.

Acuicultura y obtención de alimentos

La acuicultura se realiza dentro del embalse de la presa José María Morelos y las principales especies capturadas son: Tilapia, Bagre, Carpa Herbívora y Plateada y la Acamaya, para lo cual existen alrededor del embalse 9 cooperativas dedicadas a la pesca de estas especies.



Riego

En las dos márgenes del vaso cerca de la cortina, existen obras de toma de la CNA que alimentan al distrito de riego número 98 (figura 1.4) que tiene un área de 12 300 hectáreas, de las cuales sólo son beneficiadas 4 000 de estas para un total de 1 843 usuarios, de los cuales 753 son por margen izquierda y 1 090 por margen derecha.

1.1.4 - DESCRIPCIÓN DEL MEDIO SOCIAL

Las ciudades próximas al sitio de la presa comprenden parte de los estados de Michoacán y Guerrero, dentro de ellas se encuentran las ciudades de Lázaro Cárdenas y Guacamayas y los poblados de La Villita, El Reino y San Rafael en el estado de Michoacán, mientras que para el estado de Guerrero las localidades más próximas son la ciudad de Petacalco y las comunidades de El Huicomo, Barranca de Marmolejo, La Villita, Tamacuas, Zacatula, El Naranjito y San Francisco.

Infraestructura y servicios

Los dos municipios en cuestión para la zona de interés son los de Lázaro Cárdenas, Michoacán y La Unión, Guerrero, el primero de ellos cuenta con 148.1 Km de red carretera, de los cuales 139.8 Km son troncal federal pavimentada, y el municipio La Unión tiene dentro de su territorio aproximadamente 95 Km de carreteras pavimentadas y 130 Km de caminos de terracerías.

El acceso a servicios básicos adecuados de agua potable, electricidad y saneamiento, figura entre las demandas más sentidas de la población, los cuales han mejorado paulatinamente. Respecto al agua potable se tienen problemas de captación, almacenamiento y distribución, debidos básicamente a la inadecuada operación y falta de mantenimiento. El agua para uso doméstico se toma de pozos, además de la utilizada de la presa José María Morelos. Concretamente, en el municipio de La Unión, Guerrero, este problema es más grave ya que el nivel de dotación de servicios de agua potable es el más bajo en el estado, debido a fuentes agotadas, insuficientes, contaminadas, distantes y poca capacidad de conducción. El drenaje y alcantarillado también representan una de las necesidades primordiales, ya que este servicio en ninguno de los dos municipios alcanza a cubrir a la mitad de la población.

1.1.5 - ESTRUCTURA ECONÓMICA

La población económicamente activa en Lázaro Cárdenas se concentra en personas con edades entre los 15 y 54 años, siendo el grupo de edad con mayor porcentaje el de 20 a 24 años.

Existe una gran disparidad entre los dos municipios en estudio, por ejemplo, en el municipio de La Unión, Guerrero, el sector primario ocupa la principal actividad (58%) y el secundario el 22%, en cambio para el municipio de Lázaro Cárdenas el sector secundario ocupa el 42% y el terciario el 40%.

La principal actividad económica de las comunidades que se encuentran asentadas a la orilla del embalse de la Presa José María Morelos, es la pesca, que venden sus productos a través de las cooperativas de pescadores que comercializan su producto en la cortina.



La construcción de las presas de El Infiernillo en 1964 y José María Morelos en 1968, fueron determinantes para dar inicio al desarrollo económico de la zona, generando empleo a los pobladores en su etapa de construcción. Los beneficios que se obtuvieron fueron además la introducción de energía eléctrica a las poblaciones de Lázaro Cárdenas, Playa Azul y las Guacamayas principalmente. El almacenamiento de agua en el embalse permitió la irrigación agrícola, generándose con esto el Distrito de Riego N° 98.

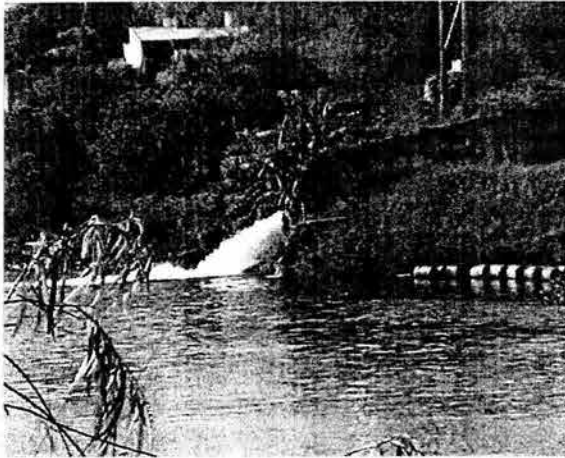


Figura 1.2 - Descargas de aguas residuales sobre la margen derecha del Río balsas



Figura 1.3 - Obra de toma para el abastecimiento del Distrito Industrial Marítimo

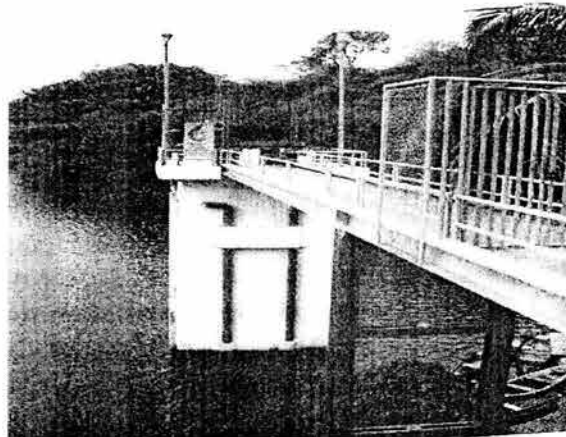


Figura 1.4 - Obra de toma de la margen derecha para el distrito de riego 98



1.2 - UBICACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA “LA VILLITA”

La Central Hidroeléctrica en operación “La Villita” es el último aprovechamiento de la cuenca del sistema Hidroeléctrico del Río Balsas, se localiza sobre el cause principal de este río en el municipio de Lázaro Cárdenas a 15 Km de la desembocadura al Océano Pacífico, a 55 Km aguas abajo de la Central Hidroeléctrica “El Infiernillo”, a 15 Km de Cd. Lázaro Cárdenas, Michoacán y a 95 km de Ixtapa Zihuatanejo, Guerrero. En la boquilla, el río sirvió como límite a los estados de Guerrero y Michoacán. Sus coordenadas geográficas son 18° 02' 38" latitud norte y 102° 11' 01" longitud oeste y su localización en cartas de INEGI escala 1:250 000 es E13-6-9 y en escala 1:50 000 es E13-B89.

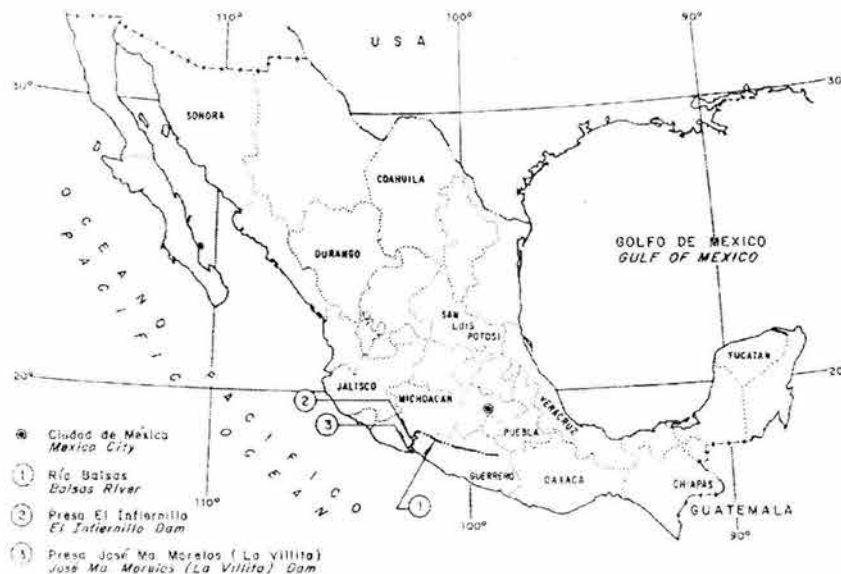


Figura 1.5 – Ubicación de la presa José María Morelos

Fue construida por la Secretaría de Recursos Hidráulicos (S. R. H.) a través de la Comisión del Río Balsas durante los años 1964 y 1968, los trabajos comprendieron las obras de desvío, contención y excedencias, así como las dos obras de toma para riego, ubicadas una en cada margen. La parte correspondiente a la construcción de la planta Hidroeléctrica “La Villita”, la efectuó la Comisión Federal de Electricidad una vez concluidas las obras de la S.R.H. El aprovechamiento fue concebido para captar las descargas de El Infiernillo para la generación de energía eléctrica, para abastecer de agua para riego a 12 300 hectáreas de terreno de los estados de Guerrero y Michoacán y para el control de avenidas, actualmente proporciona también un volumen importante de agua para la industria y poblaciones aledañas.

1.3 - GEOLOGÍA

De manera general, el Estado de Michoacán comprende parte de los terrenos de dos provincias geológicas: el 45% de la superficie se encuentra en el eje Neovolcánico y el otro 55% en la Sierra Madre Sur. Por su localización dentro de la Sierra Madre del Sur, el suelo aledaño a “La Villita” presenta una geología donde predominan las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias causadas por los diferentes eventos tectónicos y magmáticos desde el mesozoico hasta el reciente, dando lugar a los terrenos más antiguos de Michoacán.



El subsuelo esta constituido por rocas ígneas intrusivas y metamórficas (granitos, pizarras y esquistos) pertenecientes al periodo del paleozoico, por lutitas, areniscas, calcáreas y calizas del periodo mesozoico, por brotes ígneos y sedimentos continentales del terciario y por aluviones característicos del cuaternario. En dicho terreno, el conjunto de rocas metamórficas, volcánicas e intrusivas han sufrido esfuerzos tectónicos que se han manifestado en plegamientos y dislocaciones, provocando que el subsuelo de la región se seccione en bloques que colaboran para facilitar las elevaciones o hundimientos del subsuelo en cuestión. La presencia en algunas áreas de depósitos de aluviones que descansan sobre las rocas metamórficas, demuestra que la zona en estudio alguna vez fue una planicie aluvial que ha sido modificada por el proceso tectónico generando predominantemente descensos regionales respecto al nivel del mar.

Específicamente, las formaciones del subsuelo en la zona de la presa son del terciario, consistiendo principalmente en rocas intrusivas, tobas y sedimentos aluviales. En ambas márgenes de la boquilla, estas formaciones son capas estratificadas de andesita y brechas andesíticas con rumbo NE-SW y fuerte echado hacia el SE. Los estratos señalados, que van desde pocos centímetros hasta varios m de espesor, están afectados por un fracturamiento intenso con dirección general NE-SW y buzamiento hacia el NW.

Los materiales de acarreo sobre los cuales se desplanto la cortina, forman un depósito de 70 m de espesor aproximadamente formado por boleos, gravas, arenas y limos. Sus laderas están apoyadas sobre rocas volcánicas andesíticas alteradas y parcialmente metamorizadas por los efectos de una intrusión granodiorítica, además la margen derecha se encuentra cortada por un sistema de fallas con una dirección general NE.

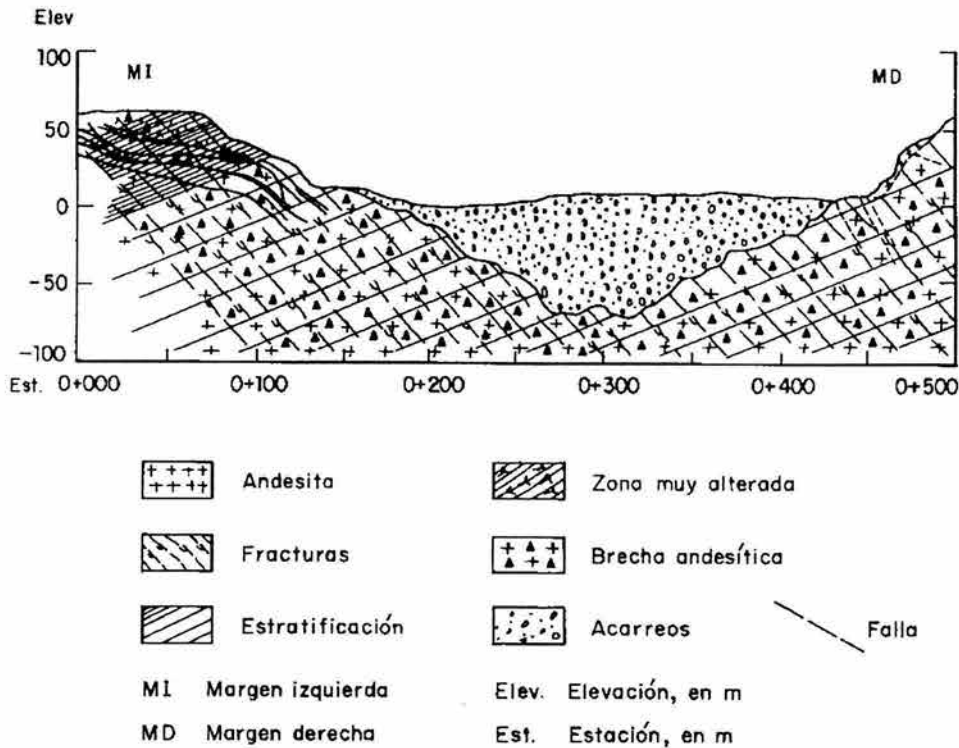


Figura 1.6 - Corte Geológico de la boquilla de la presa



1.4 – DESCRIPCIÓN DE LA PRESA

Cuenta con una cortina de tierra y enrocamiento con una altura máxima de 60 m y un trazo en arco hacia aguas abajo de 900 m de radio, el ancho de la corona es de 14 m y el ancho de la base de 335 m y tiene una longitud en la corona de 420 m. El núcleo impermeable con taludes de 0,2:1 está construido con material arcilloso poco compresible y protegido en ambos lados por un conjunto de filtros y transiciones hechos con arenas y gravas de depósitos aluviales, además presenta como capa externa un enrocamiento selecto con taludes de 2,5:1. En su cimentación y con el objetivo de reducir las posibles filtraciones a través del material sobre el que descansa la estructura, se construyó una pantalla impermeable de concreto a lo largo del eje de la cortina, de 60 cm de espesor y 91,40 m de profundidad máxima, 74 de ellos contados a partir del lecho del río.

La longitud de su embalse es de 51 Km aproximadamente, llegando casi hasta la cortina de la presa “El Infiernillo”, ocupando una superficie de 2,919 hectáreas, por lo que dicha presa representa el segundo almacenamiento en importancia del estado debido a su volumen de almacenamiento con un total de 710 millones de m³, de los cuales 330 millones de m³ corresponden a la capacidad muerta, 180 millones de m³ a la capacidad útil y los 200 millones de m³ restantes corresponden al almacenamiento asociado al tránsito de avenidas.

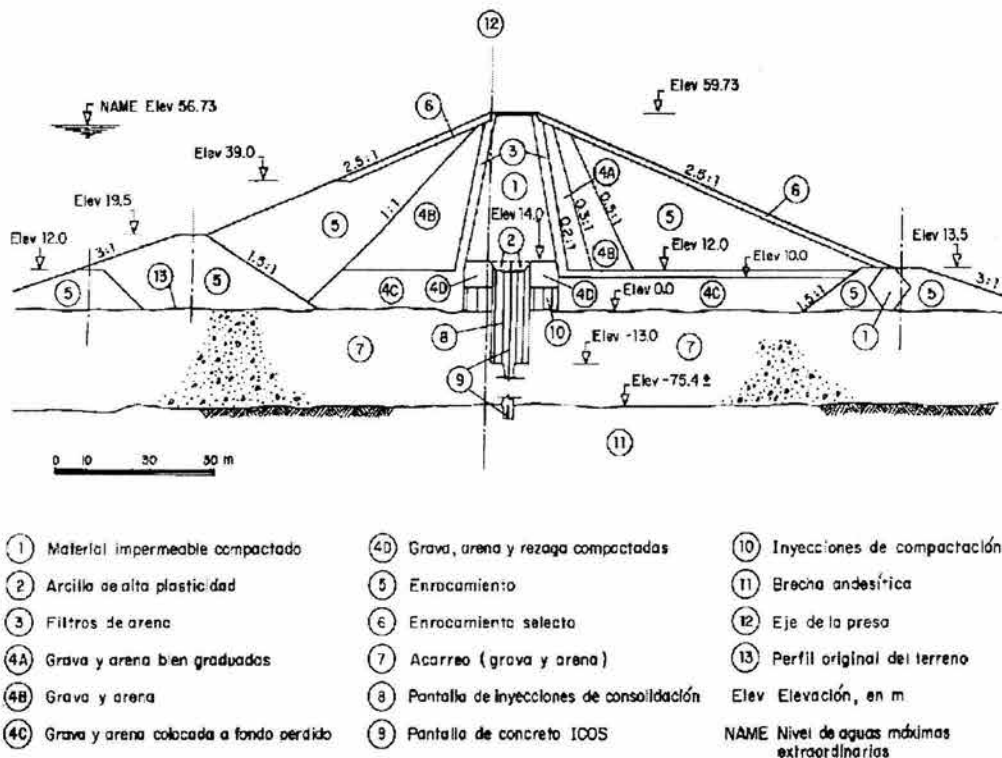


Figura 1.7 - Sección máxima de la presa José María Morelos

La obra de control y excedencias se encuentra alojada en la margen derecha a unos 500 m del extremo occidental de la cortina, es controlado por siete compuertas radiales de 14,00 m de ancho y 10,50 m de altura. La longitud total de la cresta es de 98 m con elevación 39,73 msnm. El cimacio descarga a una rápida con pendiente de 0,001 hasta llegar a una curva vertical de 30 m de radio y un ángulo de 37° 01', la cual se conecta con la estructura terminal que consiste en un deflector de salto de esquí.



La obra de toma para riego de la margen izquierda está constituida por un túnel de sección herradura de 2,5 m de diámetro y 133 m de longitud total, a la salida de éste hay una rápida que termina en un tanque amortiguador que descarga directamente sobre el canal de riego. La obra de toma para riego de la margen derecha, se encuentra ubicada sobre el costado derecho de la obra de excedencias y es de la misma capacidad y características similares a la de margen izquierda, pero de mayor longitud ya que su desarrollo total es de 317 m.

La obra de generación comprende varias componentes, cuyas características principales consisten en lo siguiente:

La obra de toma utilizada para conducir el agua a la casa de máquinas se localiza sobre la margen derecha y aprovecha dos túneles de 10,50 m de diámetro revestidos de concreto, los cuales se utilizaron para el desvío del río durante la construcción de la obra de excedencias y de la cortina.

La casa de maquinas es exterior y de estructura metálica, tiene 100 m de longitud, 32,50 m de ancho y 44 m de altura, esta ubicada sobre la margen derecha y al pie de la cortina, aloja en su interior a cuatro unidades tipo Francis de eje vertical de 75 MW de capacidad cada una que operan con un gasto de diseño de 192 m³/s y caída neta de diseño de 44 m. El agua turbinada en la central se reintegra al cauce principal del Río Balsas, mediante un canal de desfogue de aproximadamente 600 m de longitud. Esta central entro en operación el 19 de enero de 1973 y ha producido una generación media anual de 1 165.71 GWh según datos históricos recopilados desde 1973 hasta el 2000.

1.5 - SISMICIDAD

Dentro de las catástrofes naturales de mayor impacto que ha podido experimentar el ser humano, se encuentra el fenómeno "sismo", sus efectos son variados y sin duda los más importantes son los **humanos**, que involucran lesiones y hasta pérdidas humanas y los **sociales**, que afectan los servicios públicos y materiales. En el caso de una presa, pueden generar daños como filtraciones en la cortina que reducen la eficiencia de almacenamiento o en un caso extremo el colapso de la presa. Así, un fenómeno de estas características tiene la capacidad de alterar la vida cotidiana y modificar la evolución de los núcleos urbanos, por esto, ha sido merecedor de estudios por parte del hombre con el fin de entenderlos e intentar combatirlos. En la República Mexicana, los sismos son fenómenos naturales que se presentan con relativa regularidad.

Como definición un sismo es un fenómeno geológico que tiene su origen en la corteza del globo terrestre y consiste en la manifestación superficial de la liberación de energía interna de nuestro planeta en forma de vibraciones de corta duración e intensidad variable. El movimiento se transmite a través de ondas elásticas longitudinales y transversales, de las cuales se distinguen básicamente tres tipos, dos de ellas internas que se propagan en todas direcciones en el interior de la Tierra, la más rápida es la onda primaria u onda "P", la cual comprime y expande la roca en la misma dirección que viaja, estas ondas son capaces de viajar a través de líquidos. La otra viaja a menor velocidad y es llamada onda secundaria o "S", deforma los materiales y se propaga perpendicularmente respecto a su trayectoria por lo que no se transmite en líquidos ni en gases ya que estos tienen nula resistencia al esfuerzo cortante.

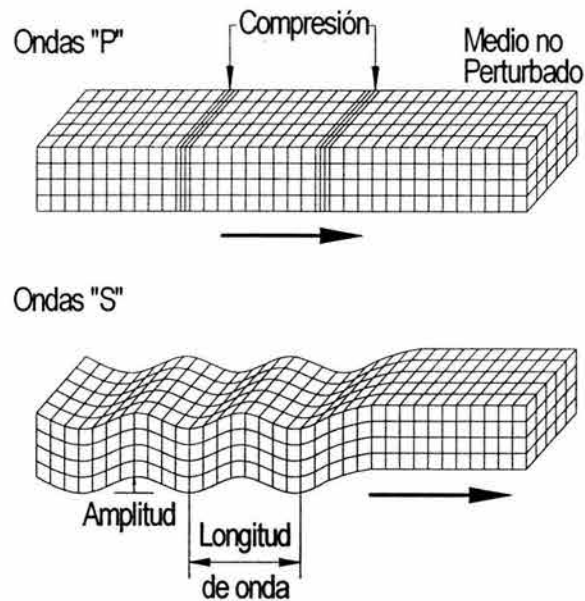


Figura 1.8 – Ondas elásticas longitudinales y transversales

Al tercer tipo de ondas sísmicas se les conoce como superficiales y se caracterizan por propagarse más superficialmente en la tierra, estas ondas disminuyen la amplitud de su movimiento a medida que la profundidad aumenta y viajan más despacio que las ondas internas. Cuando son generadas por el sismo se clasifican en dos grupos: las ondas "Love" y las ondas "Rayleigh", las primeras son más rápidas y se comportan de manera similar a las ondas "S", las segundas tienen un movimiento vertical, similar a las ondas de mar.

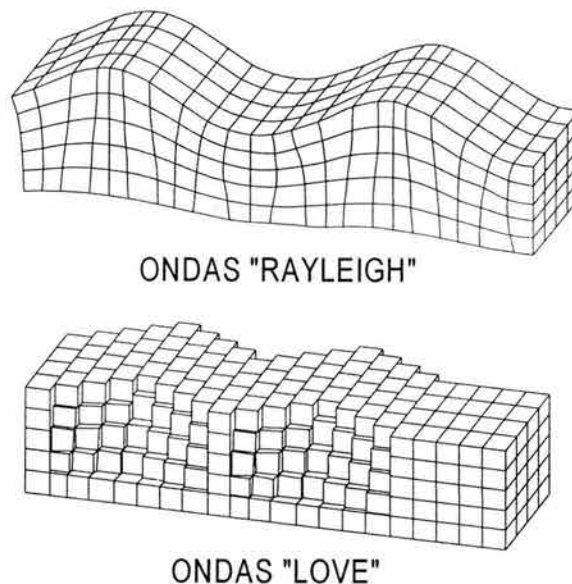


Figura 1.9 – Ondas sísmicas superficiales



Para comprender mejor el origen de los sismos, es necesario conocer la estructura interna de la Tierra, la cual está establecida por tres grandes capas: **núcleo**, localizado al centro de la Tierra y dividido en núcleo interno que se compone por materiales pesados en estado sólido y muy denso y núcleo externo compuesto por metales pesados en estado fundido y a altas temperaturas; **manto**, o capa intermedia en estado sólido de gran espesor que en su extremo superior presenta una zona en estado viscoso capaz de deformarse y fluir plásticamente; y la **corteza** o parte más superficial del globo terrestre, de estructura rígida y con un espesor muy pequeño en comparación de las otras.

1.5.1 - MOVIMIENTO DE CONVECCIÓN Y DERIVA CONTINENTAL

En 1912, el científico alemán Alfred Wegener formuló la teoría de la deriva continental, la cual supone que en una época de la evolución de nuestro planeta, hace más de 200 millones de años, los continentes estuvieron agrupados en uno sólo, al que Wegener llamó "Pangea". El movimiento del magma fundido dentro del manto terrestre provocó que la Pangea se rompiera y que los enormes trozos se desplazaran lentamente durante millones de años, hasta formar la distribución actual de los continentes.

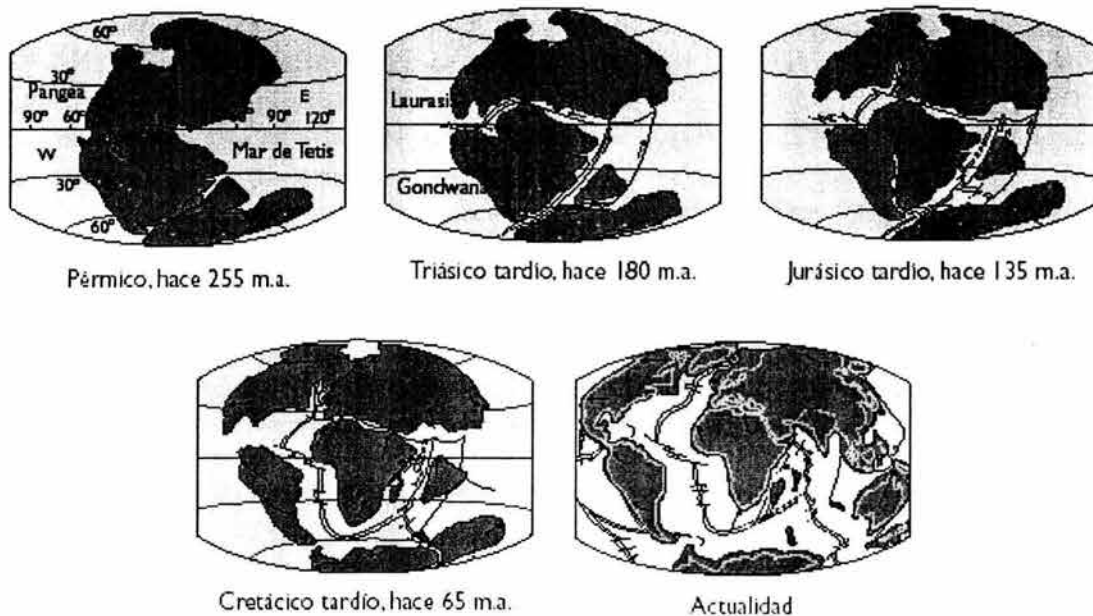


Figura 1.10 - Cambios en la forma y ubicación de los continentes en 200 millones de años

La causa principal de este desplazamiento es la difusión de calor desde el núcleo hasta la superficie terrestre, donde la masa caliente asciende y baja cuando se enfría (Movimiento convectivo), razón por la cual se han producido fracturas en la corteza terrestre que hacen que no sea de una sola pieza y este formada por diferentes pedazos denominados "Placas" que están en continuo movimiento como grandes balsas a la deriva (Deriva Continental), chocando, separándose o deslizándose, teniendo la capacidad de provocar sismos, erupciones volcánicas y formación de montañas.

De acuerdo a lo anterior, las placas tectónicas pueden definirse como gigantescos fragmentos que abarcan tanto superficies continentales (donde se ubican los continentes), como el fondo oceánico, que a manera de un gran rompecabezas esférico, componen el planeta, dichas placas flotan sobre una capa que recibe el nombre de Astenósfera, la cual oscila entre el estado líquido y sólido a altísimas temperaturas por lo que se



producen las corrientes de convección que provocan su movimiento mediante un proceso muy lento, donde el material se mueve pocos centímetros al año, pero de manera continua.

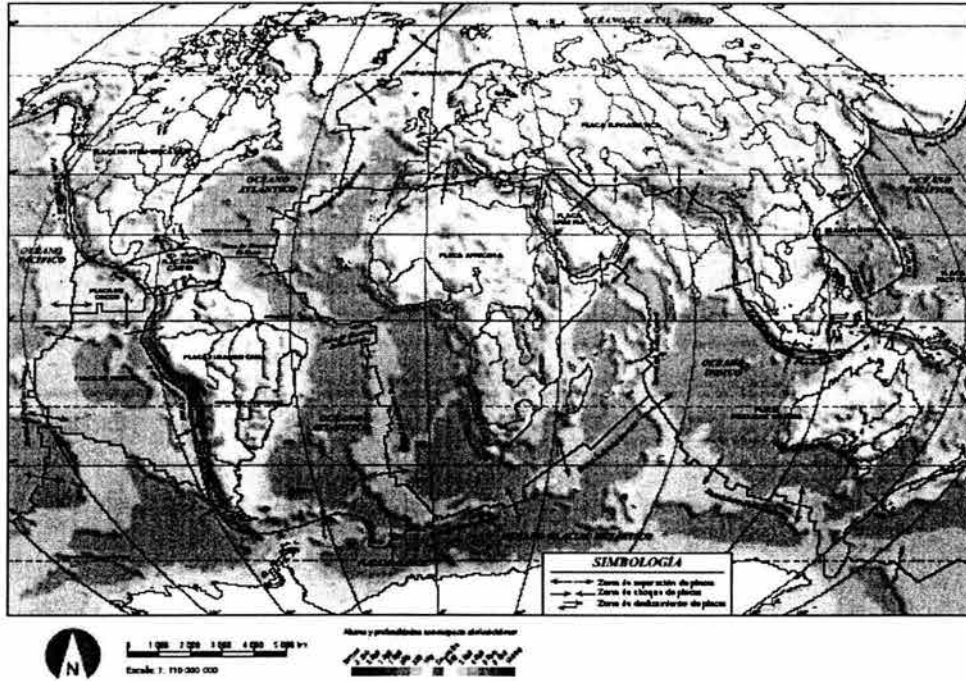


Figura 1.11 - Placas Tectónicas

1.5.2 - TECTÓNICAS DE PLACAS

La deriva continental permite hablar de bloques que se desplazan en la corteza terrestre, esto dio lugar a la tectónica de placas en los años sesenta, con la cual se expone que las placas presentan en general tres tipos de movimiento: **Divergente**, cuando las placas se separan entre sí, generando un hueco que es rellenado por el ascenso de material fundido que se adosa a las placas cuando se solidifica, formando zonas de gran vulcanismo. **Convergente** o de compresión, cuando las placas chocan generando zonas de subducción, en donde las placas se enciman (una debajo de otra). Generalmente este movimiento origina el levantamiento de las montañas o la aparición de nuevas, así como las brechas de actividad sísmica. **Transformación** o roce, debido a que ambas placas se mueven en direcciones laterales opuestas y sus bordes hacen contacto produciendo un roce.



Figura 1.12 – Tipo de movimientos entre placas tectónicas



1.5.3 - SUBDUCCIÓN

Se conoce así a las zonas donde una placa oceánica choca con una placa continental y la primera se introduce por debajo de la segunda, estableciendo una zona de contacto entre ellas donde se acumula el desplazamiento impedido por la fuerza de fricción durante cierto tiempo, hasta que la energía almacenada supera a la fuerza de fricción actuante y se libera generando un desplazamiento súbito que provoca un sismo de subducción. Otras veces, al liberarse la energía acumulada se relajan y reacomodan los esfuerzos tectónicos generando en la mayoría de los casos la reactivación de fallas locales, lo que podría generar sismos como consecuencia del fracturamiento interno de la placa a profundidades mayores de la zona de contacto. De cualquier forma, el punto en la profundidad de la tierra donde la energía de un sismo es liberada se conoce como hipocentro y su proyección sobre la superficie terrestre se denomina epicentro, al cual después de arribar, se extiende a lo largo de una zona cuya extensión depende de la importancia del evento y de las características del medio por el cual se transportan las ondas.

1.5.4 - ORIGEN DE LOS SISMOS

Sismos por subducción

La corteza, aunque es rígida, se deforma, se pliega y fractura debido a las fuerzas transmitidas desde el manto superior como consecuencia del movimiento de convección en los límites entre placas, si esto genera desplazamientos convergentes entre placas, entonces generalmente habrá grandes fuerzas de fricción que mantengan atoradas dos placas adyacentes, almacenando en sus bordes la concentración de una gran cantidad de energía que al sobrepasar la resistencia de la zona de contacto de las placas, genera un desplazamiento o ruptura violenta y como consecuencia la liberación repentina de la energía acumulada, la cual es irradiada en forma de ondas que se propagan en todas direcciones a través del medio sólido de la Tierra generando un sismo, que varía su intensidad en relación directa a la cantidad de energía liberada. Los sismos más destructivos suelen ser de este tipo, como el sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985, que fue uno de los sismos más intensos en México.

Sismos por falla local

La falla local, es el resultado de la interacción entre las placas donde al presentarse un estado de relajación de esfuerzos se genera una ruptura de alguna de ellas, generalmente se presentan en zonas donde la corteza terrestre es débil y donde a lo largo de ellas se encuentran estructuras geológicas fracturadas o rotas. Las fallas son poco visibles en la superficie, ya sea por su profundidad o por estar cubiertas de suelo o vegetación. Entre las características especiales de la falla, está que su actividad no es continua en el tiempo, lo que dificulta el trabajo de comprobación de su existencia, actividad o inactividad. Otra característica es que a lo largo de la falla, pueden surgir manantiales profundos o aguas termales. Además se puede decir que presenta un rasgo tectónico visible manifestado como cuenca, depresión o valle. Los sismos generados por medio de estas fallas adquieren su peligrosidad por tener hipocentros más próximos a las construcciones humanas, aunque generalmente los sismos por falla local son de magnitud más pequeña o moderada comparados con los sismos por subducción.



Sismos por vulcanismo

Los volcanes son una formación geológica que consiste en una fisura en la corteza terrestre sobre la que se acumula un cono de materia volcánica, son en esencia aparatos geológicos que establecen una comunicación temporal o permanente entre la parte profunda de la litosfera y la superficie terrestre. Todo volcán, aunque esté inactivo, tiene su cráter en la cúspide del macizo y una chimenea que es el conducto desde la cámara magmática, hasta el cráter en la superficie. El magma cuando tiende a subir por la chimenea, ejerce una gran presión sobre los estratos superficiales y sobre las paredes internas de la misma, presión que al llegar a su máximo nivel, se libera en forma de energía y produce sismos que generalmente pueden afectar las zonas aledañas al macizo, incluso la temperatura del magma, ejerce presión que al liberarse se traduce en energía y produce sismos.

Sismos generados por la acción del hombre

Estos sismos pueden ser originados por cargas explosivas que el hombre experimenta, detonándolas tanto en la superficie como en subterráneos construidos para este fin.

1.5.5 - MAGNITUD E INTENSIDAD SÍSMICA

La magnitud de un terremoto esta relacionada con la energía liberada. Se mide en la escala Richter atendiendo a las características de las ondas sísmicas registradas en los sismógrafos. Es, por lo tanto, un valor objetivo. Esta escala de magnitudes crece en forma logarítmica, de manera que cada punto de aumento puede significar un aumento de energía diez o más veces mayor y además es abierta, de modo que no tiene teóricamente ningún límite, salvo el dado por la energía total acumulada en cada placa.

Los daños causados por un sismo dependen no sólo de la magnitud, sino de factores como la profundidad del hipocentro (a mayor profundidad mayor atenuación y menor daño), la duración del sismo o la distribución de los movimientos. Con el objetivo de valorar todos estos factores se utiliza un parámetro cualitativo denominado intensidad sísmica. La intensidad sísmica es una medida de los efectos de un terremoto en el hombre, en las obras artificiales y en la naturaleza en un lugar determinado.

Para este fin las dos escalas más utilizadas son la de Mercalli Modificada (MM) y la Escala Macro sísmica Europea (EMS), utilizadas en América y en Europa respectivamente. Ambas están graduadas entre I y XII y son similares, adoptan valores expresados en números romanos y se acepta la utilización de valores intermedios, además son escalas proporcionales por lo que una intensidad cuatro representa el doble de una dos y son subjetivas pues dependen de la percepción individual.

Magnitud	Intensidad	Efectos
<= 3	I-II	Apenas perceptible
> 3 - 4	II - III	Se siente una vibración como la del paso de un camión cercano
> 4 - 5	IV - V	Pequeños objetos se vuelcan. Gente durmiendo se despierta.
> 5 - 6	VI - VII	Dificultad para mantenerse en pie. Daños en construcciones.
> 6 - 7	VII - VIII	Pánico general. Destrucción de algunos edificios.
> 7 - 8	IX - XI	Destrucción masiva. Grandes deslizamientos.
> 8 - 9	XI - XII	Destrucción total. Cambios en el perfil del terreno

Tabla 1-1 – Escalas de magnitud e intensidad sísmicas



1.5.6 - SISMICIDAD Y VULCANISMO EN MÉXICO

En México los fenómenos de sismicidad y vulcanismo adquieren una particular importancia, ya que su área de influencia abarca casi la totalidad del territorio nacional; a nivel mundial, es considerado como uno de los países con más alta sismicidad pues se estima que concentra alrededor del 8% de la actividad sísmica. Esto se debe a que su territorio está localizado en una región donde interactúan 5 importantes placas tectónicas: Cocos, Pacífico, Norteamericana, Caribe y Rivera, además de importantes fallas continentales como la de San Andrés, La Trinchera Mesoamericana y Motagua Pocholic y numerosas fallas regionales o locales con distintos grados de actividad sísmica, entre las cuales destacan la de Acambay, localizada en el centro del país y el sistema de fallas de Ocosingo en Chiapas, al sur del país.

En la vecindad de nuestro territorio existen dos fuentes potenciales generadoras de fenómenos sísmicos, una de ellas se localiza en el noroeste de la República en la península de Baja California, donde los sismos ocurren por la separación de la Placa del Pacífico respecto a la Placa Norteamericana, que se está moviendo y separando de la porción continental en dirección noroeste.

La segunda, representa la mayor fuente de actividad sísmica para nuestro país, y se debe a la subducción en el límite entre la Placa de Cocos y la Placa Norteamericana que abarca la mayor parte de la costa del Pacífico y el centro de México, en donde la placa oceánica inicia un proceso de fricción cuando se mueve debajo de la porción continental, el choque y la fricción forman plegamientos y fracturas en la zona de la corteza, con lo cual se originan tanto sismos por subducción con mayor regularidad, como sismos por falla local e incluso por vulcanismo. Su gran actividad se relaciona con la estructura de la Placa de Cocos que está formada por varios fragmentos, donde cada uno tiene una dirección y una velocidad de subducción diferente, desarrollando una cantidad mayor de brechas.

La historia de los temblores en nuestro país ha demostrado que en un periodo promedio de tres años acontece un sismo de gran magnitud, que puede ocasionar la muerte de personas, daños materiales y destrucción de edificaciones e instalaciones en mal estado, además de un alto grado de afectación psicológica entre la población. Durante el siglo pasado, ocurrieron en nuestro país 95 sismos de 6.4 a 7.0 grados en la escala de Richter, 76 temblores de 7.0 a 8.0 y 3 de magnitud superior a 8 grados, además de acuerdo con las estadísticas del Instituto de Geofísica de la UNAM del periodo 1974 a 1998 en México sucedieron aproximadamente 29 100 temblores, de magnitudes comprendidas entre 2.0 y 8.3 grados en la escala de Richter, lo que demuestra que México es considerado una zona altamente sísmica.

Las zonas afectadas por sismos comprenden completamente el territorio de 11 entidades federativas y parte del territorio de otras 14, abarcando más del 50% del total nacional. Particularmente la presa José María Morelos se localiza en la zona de alta sismicidad paralela a la Costa del Pacífico Sur y asociada a la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Norteamericana, dicha zona representa uno de los lugares con mayor actividad sísmica del mundo que afecta en forma marcada a los estados de Oaxaca, Chiapas, Colima, Jalisco, Guerrero y Michoacán.

Desde su construcción, "La Villita" ha sido sometida a cargas dinámicas provocadas por fenómenos sísmicos de diferentes magnitudes, sin embargo, a pesar del historial sísmico de la zona, para este análisis sólo serán considerados los temblores que han sido registrados por los acelerógrafos de la cortina hasta el mes de enero del 2003, siendo estos un total de 223 sismos de magnitud mayor a los 2° Richter.



Capítulo I - Generalidades

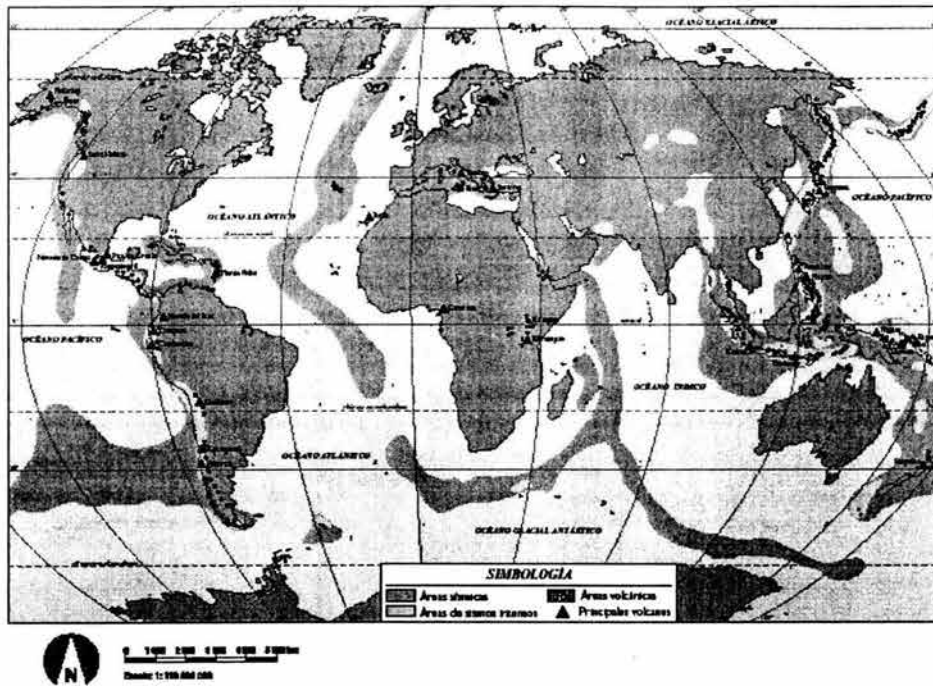


Figura 1.13 - Zonas sísmicas y volcánicas en el mundo

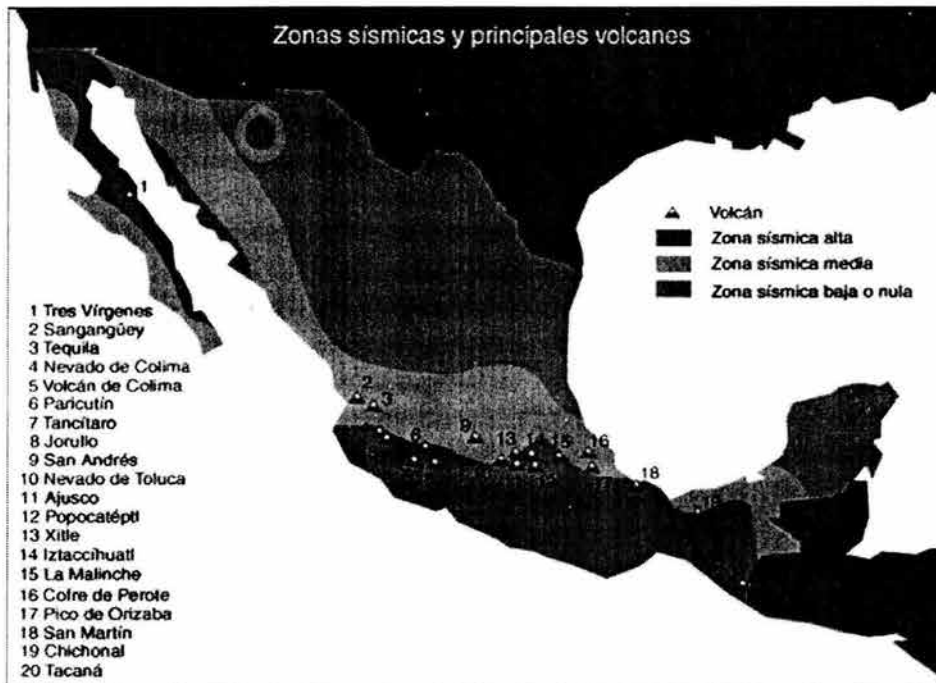


Figura 1.14 – Zonas sísmicas y principales volcanes de México



Falla de Clarion

La fractura de Clarion situada sobre la Placa del Pacífico, se extiende desde el sur de las Islas Hawai en la parte central del Océano Pacífico, hasta la Dorsal¹ en las Islas Revillagigedo, su longitud aproximada es de 6 000 Km. Al pasar a la placa de Norteamérica, ya sobre el continente se conoce como Eje Volcánico, donde la parte más oriental esta en los Tuxtlas, en el estado de Veracruz, alcanzando una extensión desde la Dorsal de aproximadamente 1 700 Km.

También es conocida como Falla de 19° debido a su cercanía con la latitud 19° N, representa un rasgo tectónico distintivo de la República Mexicana por ser una rotura de la corteza continental que recorre transversalmente, de costa a costa, el territorio nacional, y en la cual se ha formado una cadena de volcanes (Faja Volcánica Transversal) con presencia de un continuo flujo de lava proveniente del interior de la tierra con el que puede reactivarse cualquiera de los volcanes ahí situados. Los efectos geológicos del estado de Veracruz son principalmente realizados por la actividad de esta falla.

Falla “La Paloma”

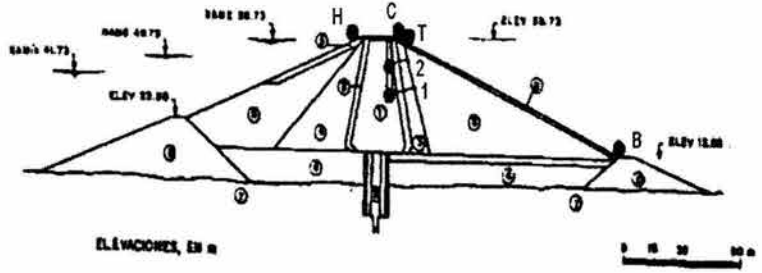
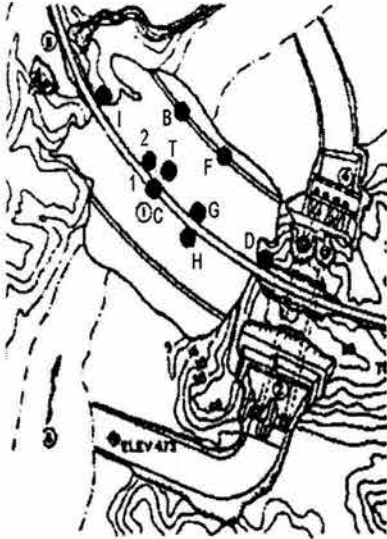
La falla de la Paloma se localiza en la ciudad de Morelia, generada por una falla con evidencias de actividad sísmica pues se han verificado movimientos de terreno, que por su morfología están relacionados a eventos sísmicos. Es una falla de tipo normal con desniveles de más de 200 m y que forma parte del sistema Morelia-Acambay, la falla se ubica al sur de la ciudad de Morelia la cual se caracteriza por la presencia de actividad sísmica y volcánica relacionada a numerosas estructuras activas.

En lo referente al fenómeno del vulcanismo, en México existen actualmente volcanes activos clasificados como de alto riesgo, riesgo intermedio y riesgo moderado, localizados en su mayoría, dentro de la Cordillera Neovolcánica o Faja Volcánica Mexicana.

1.6 - INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

La presa José María Morelos ha sido instrumentada hasta con trece acelerógrafos (Figura 1.15), diez en el cuerpo de la presa en las elevaciones 60 (Puntos C, G, H y T), 49.50 (Punto 2), 35 (Punto 1), 30 (Punto 6), 13.50 (Puntos B y F) y uno instalado dentro del inclinómetro P; los tres restantes han sido localizados en roca al nivel de la corona, dos sobre la margen derecha y uno en la margen izquierda (Puntos D, E e I). Con estos instrumentos se han registrado sismos de diferentes magnitudes desde 1965. Al final de la construcción de esta presa fueron colocados los acelerógrafos indicados con los puntos B, C, D e I, los demás fueron instalados en el periodo de 1987 – 1989. Actualmente solo se encuentran instalados los equipos B, C, D, F, I y T, con los cuales se monitorea la base, la corona y las márgenes de la estructura, el resto de los equipos solo fueron utilizados durante periodos de prueba o han tenido que ser retirados debido a inundaciones de las casetas donde se alojaban.

¹ Dorsal: También conocida como Cordillera Centro Oceánica, se localiza en la parte central del Océano Atlántico y alcanza una longitud de aproximadamente 60 000 Km, es en ella donde se originan las placas tectónicas.



- ① NÚCLEO IMPERMEABLE
- ② FILTRO
- ③ REZAGA
- ④ GRANA-ARENA
- ⑤ ENROCAMIENTO
- ⑥ ENROCAMIENTO PESADO
- ⑦ ALLIARÓN DEL RÍO
- ⑧ PANTALLA (CONCRETO)
- ⑨ ATARQUE AGUAS ARRIBA
- ⑩ ATARQUE AGUAS ABAJO

ELEV ELEVACIONES, EN M

- ① PRESA
- ② OBRA DE TOMA
- ③ VERTEDEDOR
- ④ CASA DE MÁQUINAS
- ⑤ OBRA DE TOMA PARA RIEGO
- ⑥ RÍO BALSAS

● ESTACION ACELEROGRAFICA	
SIGLA	NOMBRE
VIL1	VILLITA MARGEN IZQUIERDA
VIL2	VILLITA MARGEN DERECHA
VILC	VILLITA CORONA CENTRO
VILT	VILLITA CORONA TESTIGO
VILB	VILLITA BASE CORTINA
VILH	VILLITA 0+355 AGUAS ARRIBA
VILG	VILLITA 0+355 AGUAS ABAJO
VILF	VILLITA 0+355 BASE CORTINA
VID1	VILLITA POZO h= 2.5 m
VID2	VILLITA POZO h= 10.5 m

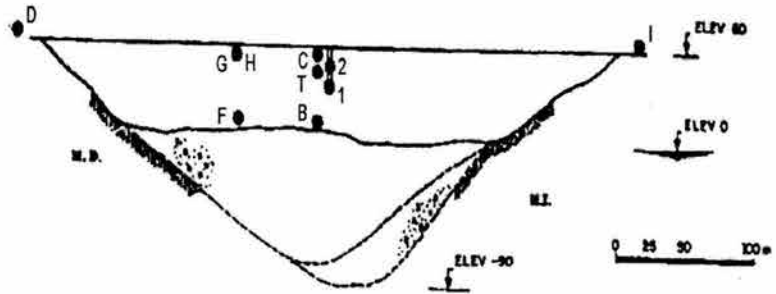


Figura 1.15 - Instrumentación sísmológica en la presa José María Morelos.



1.7 - INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

Con la finalidad de evaluar el comportamiento geotécnico de la presa José María Morelos fueron instalados aparatos de medición tanto en el cuerpo de la cortina como en la cimentación de la misma, especialmente en la pantalla de concreto. Dichos equipos fueron instalados a lo largo de su eje y en varias secciones paralelas al río, en total cuenta con 188 aparatos y varias líneas de mojoneeras. Cabe destacar el gran número de piezómetros (45) dispuestos para medir la eficiencia de la pantalla construida en el aluvión, la utilización de celdas de presión por primera vez en México para conocer los esfuerzos y las deformaciones en ciertas partes de la estructura y la posibilidad de realizar mediciones en inclinómetros instalados en el respaldo de aguas arriba. La ubicación de esta instrumentación se encuentra indicada en la figura 1.16

La cantidad de instrumentos instalados y su utilidad se describe a continuación:

1. **Inclinómetros (20):** sirven para medir asentamientos y desplazamientos horizontales en dos direcciones perpendiculares, fueron instalados dentro de la pantalla de concreto y en el cuerpo de la cortina.
2. **Extensómetros (24):** se utilizan para conocer las deformaciones en el interior del cuerpo de la cortina, al medir los desplazamientos entre dos placas de referencia, en el caso de la presa José María Morelos se encuentran instalados en la ladera de la margen izquierda para detectar los posibles movimientos que podrían presentarse en los planos de fractura.
3. **Celdas de presión (71):** se utilizan para conocer esfuerzos en el interior del cuerpo de la cortina, en la presa José María Morelos fueron colocados tanto en el corazón impermeable como en los respaldos.
4. **Mojoneeras (114):** sirven para conocer desplazamientos absolutos en altimetría y planimetría de las presas, a mediano y largo plazo, mediante mediciones topográficas de nivelación, colimación, medición de distancias con cinta y triangulación. Fueron instaladas en líneas paralelas al eje de la cortina sobre los respaldos de la misma.
5. **Piezómetros abiertos (45):** utilizados para medir los niveles de agua y la presión de poro para analizar el proceso de consolidación y calcular esfuerzos efectivos a partir de las mediciones con celdas de presión, además y como en este caso sirven también para estimar filtraciones y la efectividad de la pantalla impermeable construida. Estos equipos fueron instalados tanto aguas arriba como aguas abajo de la pantalla de concreto.
6. **Niveles hidráulicos (25):** Permiten medir asentamientos en puntos internos de la presa, a lo largo de un alineamiento, basándose en el principio de vasos comunicantes. Estas líneas de niveles fueron instaladas en el interior de la presa aguas abajo de la misma.

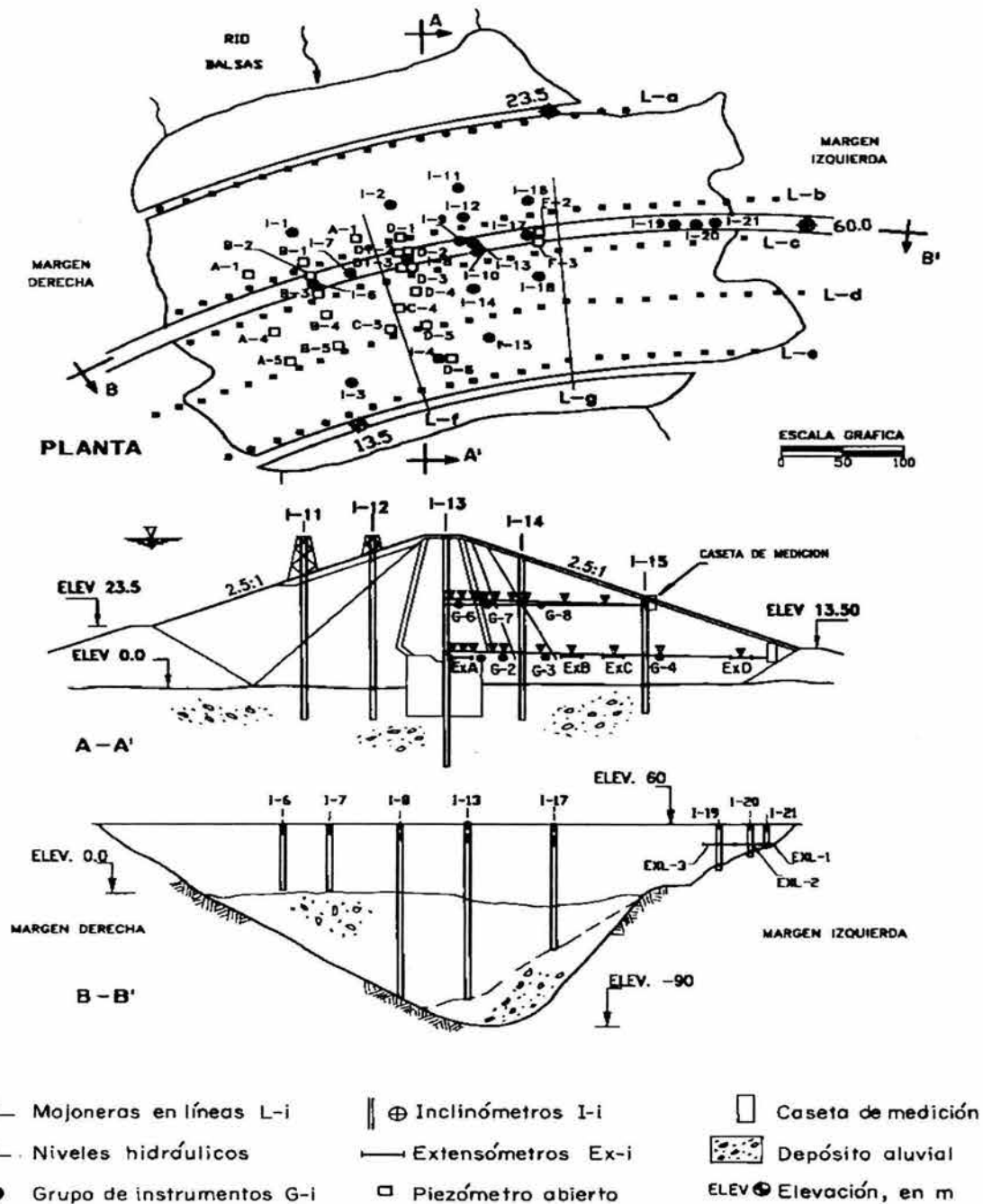


Figura 1.16 Instrumentación instalada en la presa José María Morelos

2 – SISMICIDAD

Al ocurrir un sismo, la base de las construcciones desarrolla un movimiento muy similar al del terreno sobre el cual se desplanta, resultando más fácil para las partes superiores mantener su estado de reposo inicial gracias a la propiedad de inercia y a la flexibilidad de la construcción. Esto ocasiona que mientras la base se deforma siguiendo la oscilación del terreno, las partes superiores obedecen más a la inercia que al movimiento inducido por los niveles inferiores manteniendo la integridad de la estructura aunque una vez terminado el movimiento en la base la parte superior sigue deformándose.

La respuesta ante fenómenos sísmicos que tendrá una estructura no dependerá solamente de la obra en sí, también se afectará por el tipo de movimiento que desarrolle su base, el cual obedece principalmente a características como magnitud y distancia epicentral de un temblor, otro factor importante del cual dependerá la respuesta tiene que ver con el suelo sobre el que se apoya la construcción.

Respecto a presas, los principales mecanismos de falla que se presentan debido a la acción de un sismo son el deslizamiento, la distorsión por cortante, el agrietamiento longitudinal y transversal, ruptura de conductos subterráneos, corte por desplazamiento de fallas geológicas, oscilaciones del embalse con periodos largos, el oleaje y el asentamiento de la cimentación. Todos ellos dependen tanto de las características de la presa como de las del temblor y pueden llegar a tener finales desastrosos bajo sismos muy fuertes.

La principal consecuencia provocada por estos mecanismos de falla es la pérdida de bordo libre o asentamiento en la corona, aunque también pueden llegar a generarse grietas en zonas del terraplén o asentamientos diferenciales en la corona que inducen grietas en algunos tramos de esta sección.

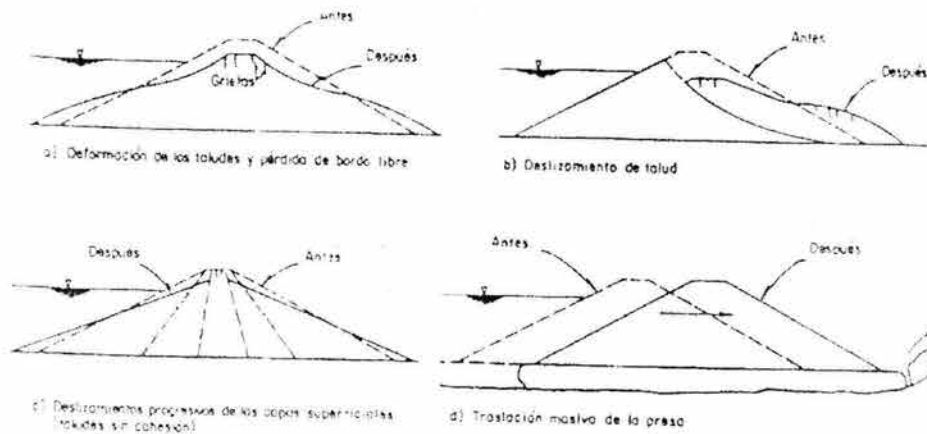


Figura 2.1 – Tipos de daños generados en presas por deformación por cortante.

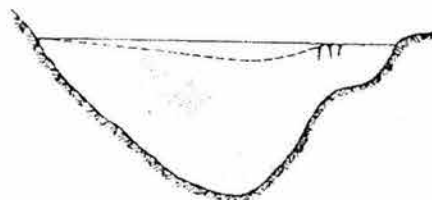


Figura 2.2 - Agrietamiento transversal inducido por asentamientos diferenciales.



2.1 - ESTADÍSTICAS DE LOS SISMOS REGISTRADOS

2.1.1 - DISTRIBUCIÓN EN MAPA

Para comenzar con el análisis dinámico de la presa José María Morelos primero fue necesario conocer las características principales de cada uno de los sismos registrados por la instrumentación dinámica de la cortina dentro del periodo histórico que va del año 1972 al año 2003.

Es por eso que a continuación se presenta, mediante la figura 2.3, la localización de los epicentros de cada uno de estos eventos, apreciándose de manera general que la mayoría de estos fueron generados en los estados de Michoacán y Guerrero, así como en sus costas, dentro de la zona de subducción entre la Placa de Cocos y la Placa Norteamericana, aunque también se observa que algunos sismos han ocurrido en la zona de falla normal que es característica de sismos en el continente. Cabe mencionar que sólo fueron encontrados en diversas fuentes consultadas, datos geográficos para 184 de los 223 sismos considerados



Figura 2.3 – Localización general de los epicentros de los sismos en estudio

Con las finalidades de determinar una mejor concentración de los epicentros analizados y de relacionarlos con cada uno de los sismos involucrados, se optó por desglosar la figura antes expuesta en otras siete, en las que se presenta parcialmente la localización geográfica de dichos epicentros.



Capítulo II - Sismicidad

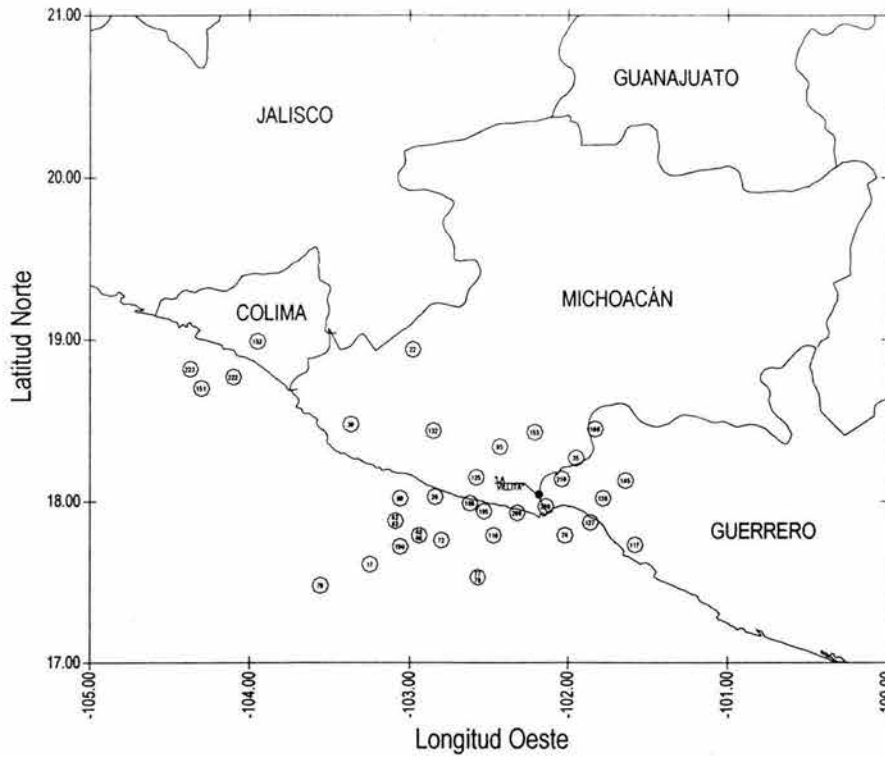


Figura 2.4 – Localización parcial de los epicentros sísmicos (a).

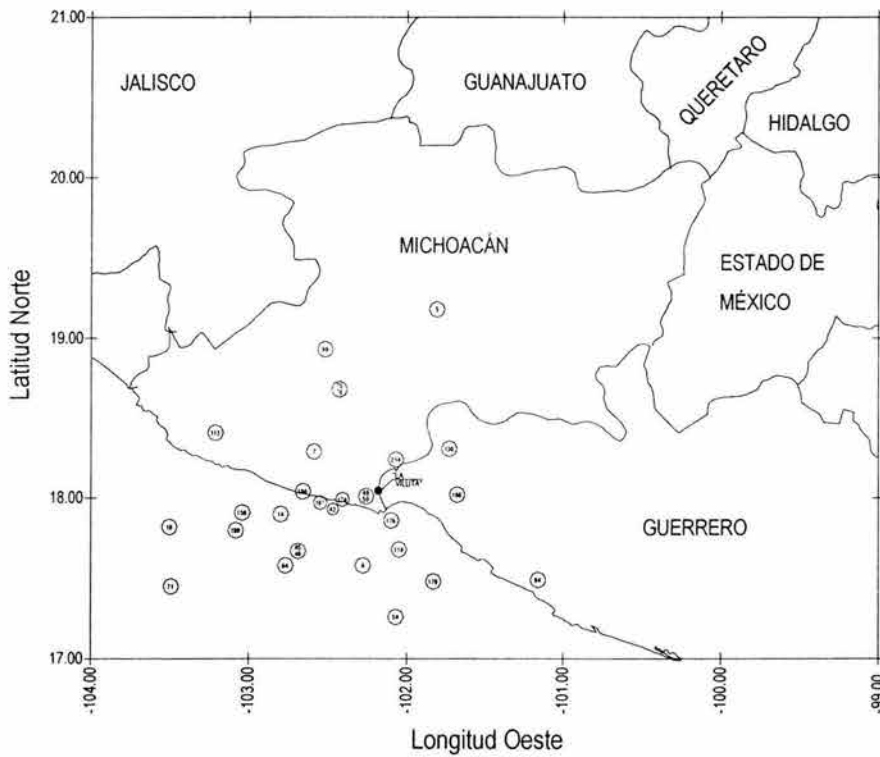


Figura 2.5 – Localización parcial de los epicentros sísmicos (b).



Capítulo II - Sismicidad

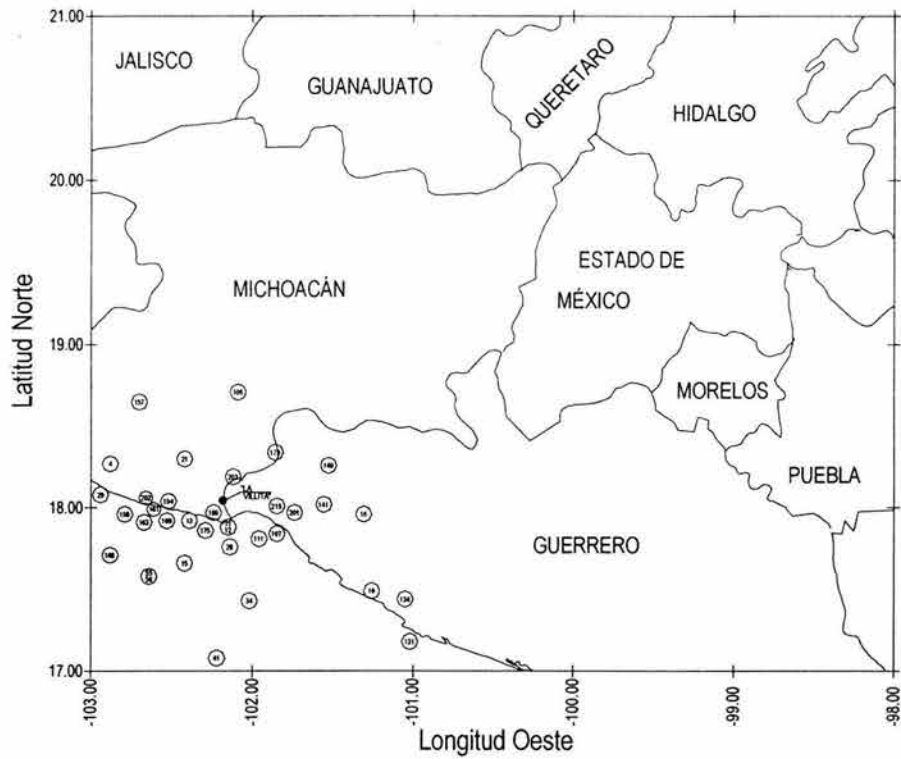


Figura 2.6 – Localización parcial de los epicentros sísmicos (c).

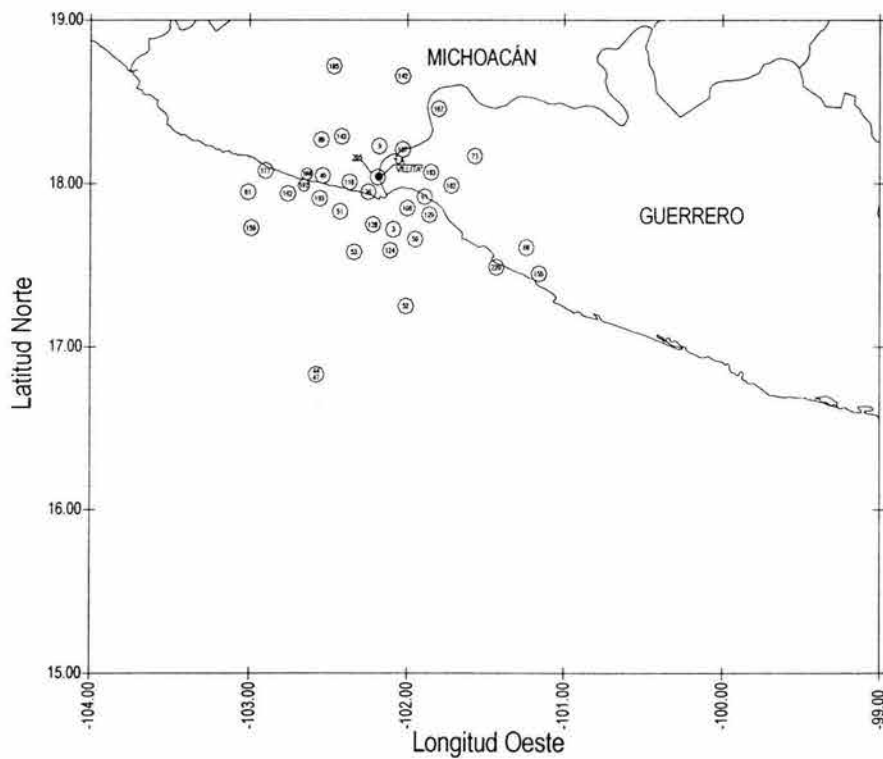


Figura 2.7 – Localización parcial de los epicentros sísmicos (d).



Capítulo II - Sismicidad

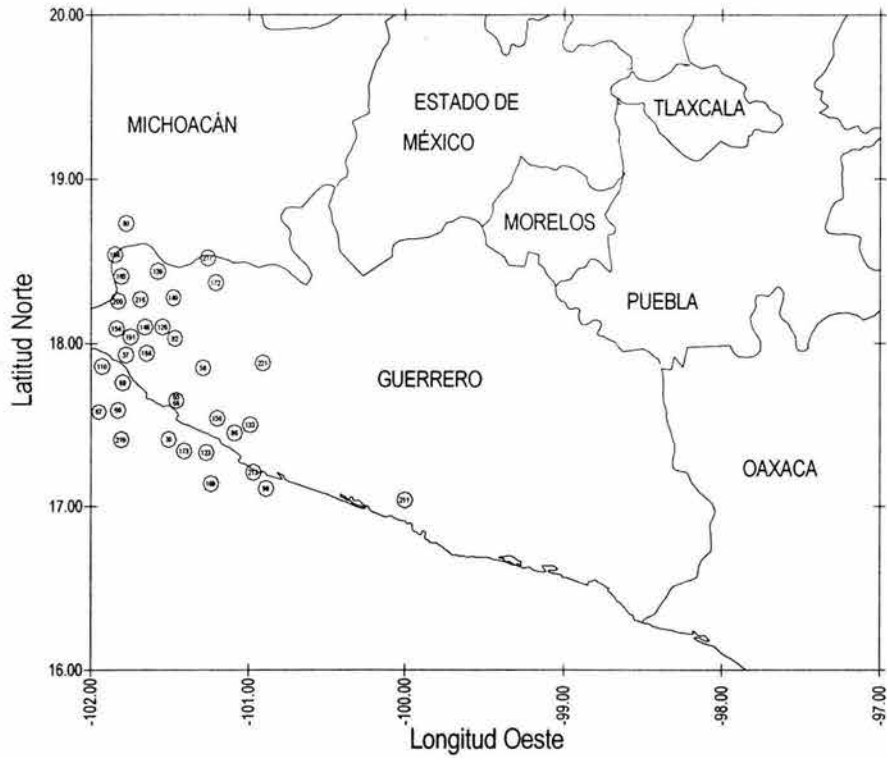


Figura 2.8 – Localización parcial de los epicentros sísmicos (e).

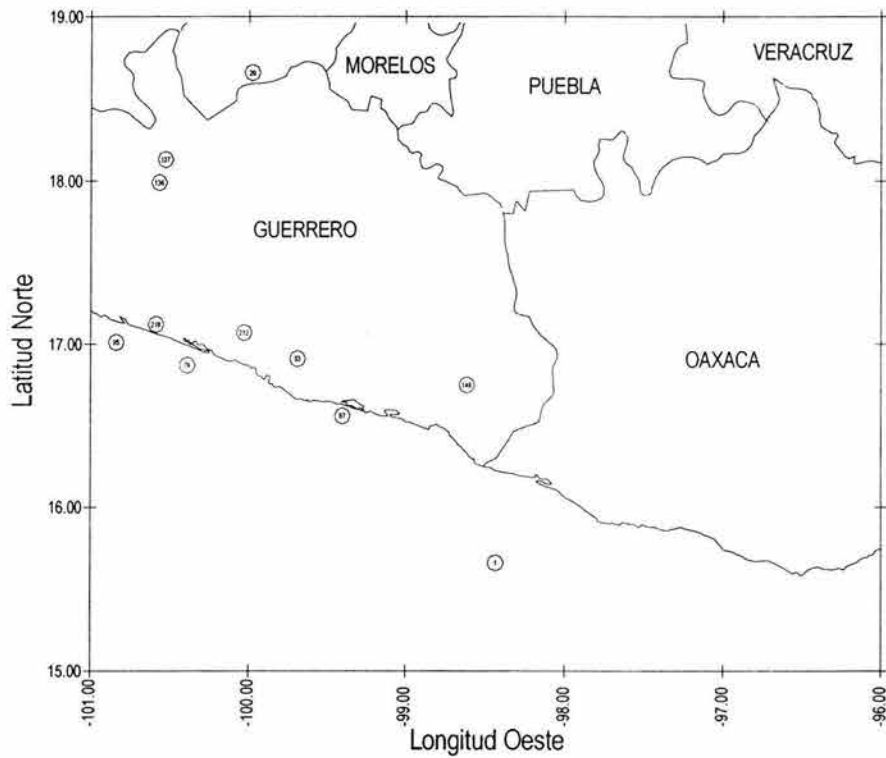


Figura 2.9 – Localización parcial de los epicentros sísmicos (f).



Capítulo II - Sismicidad

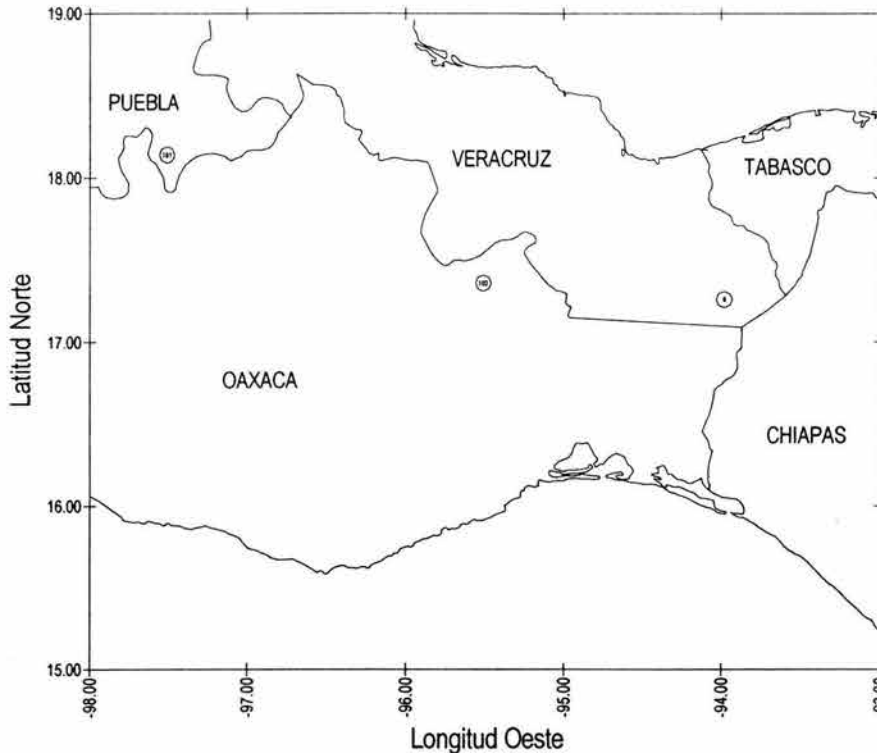


Figura 2.10 – Localización parcial de los epicentros sísmicos (g).

Con la ayuda de las figuras 2.4 a 2.10 se pudo confirmar que la mayoría de los sismos ha tenido origen en la parte continental del oeste de Guerrero y suroeste de Michoacán, en la zona denominada de falla normal, seguido por un número importante de eventos generados en las costas de los mismos estados, como consecuencia de la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana y de la Faja Volcánica Transversal que atraviesa a los estados de Colima, Michoacán y Guerrero.

Geográficamente se observó que la mayor cantidad de epicentros se desarrolló dentro de la zona limitada por las coordenadas -103° y -101° longitud oeste y 17° y 19° latitud norte, cuadrante que envuelve a las costas de Guerrero y Michoacán, además de gran parte del territorio continental de ambos estados. En esa zona fueron detectados 145 epicentros de los 184 presentados en la figura 2.3, en los cuales esta incluido el sismo del 19 de septiembre de 1985 que ha sido el más intenso según el historial sísmico de nuestra república. Estos datos corroboran la alta actividad sísmica que afecta a los estados de Guerrero y Michoacán.

Finalmente los epicentros detectados en la superficie continental de la República, tuvieron lugar en los territorios de 7 estados, y sumaron la cantidad de 95 eventos; mientras que para los sismos cuyo epicentro se localizó en las aguas del Océano Pacífico fueron contabilizados un total de 89 eventos. La forma en que se distribuyeron los sismos continentales fue la siguiente: 52 dentro de los límites del estado de Guerrero, 38 en el estado de Michoacán y 1 en cada uno de los estados de Colima, Oaxaca, Veracruz, Puebla y Estado de México.

A continuación se presenta una tabla con las coordenadas geográficas de cada uno de los epicentros mostrados en la figura 2.3.



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Coordenadas		# Sismo	Coordenadas		# Sismo	Coordenadas		# Sismo	Coordenadas	
	Oeste	Norte		Oeste	Norte		Oeste	Norte		Oeste	Norte
1	-98.43	15.70	58	-101.29	17.85	123	-101.27	17.33	173	-101.41	17.34
3	-102.09	17.72	59	-101.95	17.66	124	-102.11	17.63	174	-102.41	17.99
4	-102.88	18.27	60	-101.83	17.59	125	-102.58	18.15	175	-102.29	17.86
5	-101.81	19.18	61	-101.89	17.92	126*	-101.55	18.10	176	-102.10	17.86
6	-93.98	17.30	62	-103.09	17.88	127	-101.86	17.87	179	-101.86	18.34
7	-102.59	18.29	63	-103.09	17.88	128	-102.22	17.75	180	-102.24	17.97
8	-102.28	17.58	64	-102.77	17.58	129	-101.86	17.81	181	-97.51	18.18
9	-102.18	18.23	65	-101.46	17.65	130	-101.73	18.31	182	-101.72	17.99
10	-101.26	17.49	66	-101.46	17.65	131	-101.02	17.18	183	-101.85	18.07
11	-102.15	17.88	67	-101.95	17.58	132	-102.85	18.44	184	-101.65	17.94
12	-102.15	17.88	68	-101.24	17.61	133	-100.99	17.50	185	-102.47	18.72
13	-102.39	17.92	69	-103.06	18.02	134	-101.05	17.44	186	-101.68	18.02
14	-102.80	17.90	70	-103.56	17.48	136	-100.57	18.03	187	-102.03	18.21
15	-102.42	17.66	71	-103.49	17.45	137*	-100.53	18.17	188	-102.64	18.06
16	-101.31	17.96	72	-102.80	17.76	138	-101.78	18.02	189	-103.08	17.80
17	-103.25	17.61	73	-101.57	18.17	139	-101.58	18.44	190	-103.06	17.72
19	-103.50	17.82	74	-102.02	17.79	140	-101.48	18.28	191	-101.75	18.04
20	-99.98	18.70	75	-102.43	18.68	141	-101.56	18.02	192	-102.66	17.99
21	-102.42	18.30	76	-102.43	18.68	142	-102.03	18.66	193	-102.56	17.91
22	-102.98	18.94	77	-102.57	17.53	143	-102.42	18.29	194	-102.52	18.04
26	-102.84	18.03	78	-102.57	17.53	145*	-101.64	18.13	195	-102.53	17.44
28	-102.14	17.76	79	-100.39	16.91	146*	-101.66	18.10	196	-102.66	18.04
29	-102.94	18.08	80	-101.78	18.73	148	-98.61	16.79	197	-102.55	17.97
30	-101.51	17.41	81	-103.01	17.95	149	-101.53	18.26	198	-102.62	17.99
34	-102.02	17.43	82	-101.47	18.03	151	-104.30	18.70	199	-102.79	17.96
35*	-101.95	18.27	83	-99.69	16.95	152	-103.95	18.99	200*	-101.83	18.26
36	-102.25	17.95	84	-101.16	17.49	153	-102.23	18.39	201*	-101.74	17.97
39	-103.37	18.48	85	-102.43	18.34	154	-101.84	18.09	202*	-102.66	18.06
40	-102.54	18.05	86	-101.09	17.45	155	-101.16	17.45	203*	-102.12	18.19
41	-102.22	17.08	87	-99.40	16.60	156	-101.20	17.54	205*	-102.19	18.04
42	-102.47	17.93	88	-101.80	17.76	157	-102.70	18.65	208*	-102.32	17.93
43	-102.94	17.79	89	-102.55	18.27	158	-103.04	17.91	209*	-102.14	17.97
44	-102.58	16.83	95	-100.84	17.05	159	-102.99	17.73	210*	-102.04	18.14
45	-102.69	17.67	98	-100.89	17.11	160	-102.53	17.92	211*	-100.00	17.04
46	-102.94	17.79	99	-102.52	18.93	161	-102.61	17.99	212*	-100.03	17.11
47	-102.58	16.83	102	-95.51	17.40	162	-102.76	17.94	213*	-100.97	17.21
48	-102.69	17.67	106	-102.09	18.71	163	-102.67	17.91	214*	-102.07	18.24
49	-102.26	18.01	107	-101.85	17.84	164	-101.85	18.54	215*	-101.85	18.01
50	-102.26	18.01	108	-102.00	17.85	165	-101.81	18.41	216*	-101.69	18.27
51	-102.43	17.83	110	-101.93	17.86	166	-101.83	18.45	217*	-101.26	18.52
52	-102.01	17.25	111	-101.96	17.81	167	-101.80	18.46	218*	-100.59	17.16
53	-102.34	17.62	113	-103.21	18.41	168	-102.88	17.71	219*	-101.81	17.41
54	-102.07	17.26	116	-102.47	17.79	169	-101.24	17.14	220*	-101.43	17.49
55	-102.64	17.58	117	-101.06	17.73	170	-101.83	17.48	221*	-100.91	17.88
56	-102.64	17.58	118	-102.37	18.01	171	-102.90	18.08	222*	-104.10	18.77
57	-101.78	17.93	119	-102.05	17.68	172	-101.21	18.37	223*	-104.37	18.82

Tabla 2.1 - Coordenadas geográficas de los epicentros sísmicos en estudio

* Datos obtenidos de internet



2.2.2 - MAGNITUD

En la tabla 2.2 se concentran las características principales de los sismos registrados por los acelerógrafos instalados en la cortina de la presa José María Morelos, con magnitud mayor a 2° en la escala de Richter.

# Sismo	Fecha del sismo	Distancia del epicentro a la presa (Km)	Profundidad focal (Km)	Magnitud Richter
1	01-02-1972	482	33	Mb = 6.2
2	06-21-1972	-	-	-
3	07-21-1972	30	33	Ms = 4.8
4	01-30-1973	81	43	Ms = 7.5
5	07-03-1973	138	125	Mb = 5.6
6	10-17-1973	897	202	Mb = 4.7
7	01-04-1975	55	< 5	Mb = 4.9
8	10-11-1975	45	33	Mo = 5.5
9	11-15-1975	27	< 5	Mb = 5.9, Ms = 5.9
10	03-14-1979	115	< 5	Mb = 7.0
11	10-25-1981	12	< 5	Mb = 6.1, Ms = 7.3
12	10-25-1981	12	< 5	Mb = 5.2*
13	10-25-1981	22	< 5	Mb = 4.5
14	10-25-1981	66	< 5	Mb = 4.1*
15	10-30-1981	43	33	Mo = 4.1
16	11-01-1981	95	< 5	Mc = 5.5
17	11-11-1981	122	< 5	-
18	12-29-1981	-	-	-
19	12-30-1981	143	< 5	-
20	01-14-1982	252	33	M0 = 4.1
21	12-08-1983	43	6	Mb = 5.5
22	05-28-1985	136	< 5	Mb = 5.2
23	-	-	-	-
24	06-02-1985	-	-	-
25	06-02-1985	-	-	-
26	06-19-1985	70	< 5	Mb = 4.4
27	07-26-1985	-	-	-
28	08-26-1985	25	< 5	-
29	09-19-1985	82	15	Mb = 6.8, Ms = 8.1, Mc = 8.1
30	09-19-1985	97	< 5	Mc = 4.3
31	09-19-1985	-	-	-
32	-	-	-	-
33	09-21-1985	-	-	-
34	09-21-1985	63	< 5	-
35	09-21-1985	29*	33*	Mb = 3.5*

Tabla 2.2 – Características principales de los sismos en estudio



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del sismo	Distancia del epicentro a la presa (Km)	Profundidad focal (Km)	Magnitud Richter
36	09-21-1985	7	25	Mc = 3.1
37	09-21-1985	-	-	-
38	09-21-1985	-	-	-
39	09-22-1985	139	< 5	-
40	09-22-1985	38	20	Mc = 3.2
41	09-22-1985	99	< 5	-
42	09-22-1985	30	< 5	Mb = 4.1
43	09-24-1985	84	< 5	Mb = 4.5
44	09-24-1985	134	< 5	-
45	09-24-1985	64	< 5	Mb = 4.5
46	09-24-1985	84	< 5	Mb = 4.5
47	09-24-1985	134	< 5	-
48	09-24-1985	64	< 5	Mb = 4.5
49	09-25-1985	8	< 5	Mb = 5.3
50	09-25-1985	8	< 5	Mb = 5.3
51	09-27-1985	31	< 5	Mb = 4.7
52	10-02-1985	83	7	Mc = 3.6
53	10-03-1985	43	32	Mc = 3.4
54	10-04-1985	80	< 5	Mc = 4.0
55	10-29-1985	65	20	Mb = 5.6, Ms = 5.4, Mc = 5.1
56	10-29-1985	65	20	Mb = 5.6, Ms = 5.4, Mc = 5.1
57	11-23-1985	44	< 5	-
58	12-05-1985	99	10	Mb = 3.7, Mc = 4.4
59	12-10-1985	44	32	Mc = 3.6
60	12-23-1985	58	< 5	Mb = 4.5*
61	01-12-1986	33	< 5	Mb = 5.1, Mc = 4.7
62	01-27-1986	98	< 5	Mc = 4.7
63	01-27-1986	98	< 5	Mc = 4.7
64	02-06-1986	77	32	Mc = 3.8
65	02-07-1986	87	20	Mb = 4.9, Mc = 4.7
66	02-07-1986	87	20	Mb = 4.9, Mc = 4.7
67	02-10-1986	51	< 5	-
68	03-18-1986	111	< 5	Mb = 4.6, Mc = 4.5
69	04-30-1986	94	20	Mb = 6.2, Ms = 7.0, Mc = 6.4
70	04-30-1986	159	< 5	Mb = 4.9*
71	04-30-1986	153	< 5	Mb = 4.9*
72	05-05-1986	70	20	Mb = 5.6, Ms = 5.5, Mc = 5.6
73	06-19-1986	70	10	Mb = 5.2, Mc = 4.8
74	11-04-1986	28	15	Mb = 4.8, Mc = 4.8

Tabla 2.2 – Características principales de los sismos en estudio



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del sismo	Distancia del epicentro a la presa (Km)	Profundidad focal (Km)	Magnitud Richter
75	11-26-1986	81	< 5	Mc = 5.0
76	11-26-1986	81	< 5	Mc = 5.0
77	12-24-1986	64	< 5	Mb = 4.3*
78	12-24-1986	64	< 5	Mb = 4.3*
79	05-30-1987	229	67	-
80	07-26-1987	93	6	Mb = 5.0
81	08-29-1987	89	< 5	Mb = 4.2
82	09-10-1987	78	7	Mc = 2.6
83	11-07-1987	295	50	Mc = 2.7
84	02-08-1988	124	19	Mb = 5.5, Ms = 5.7, Mc = 5.0
85	09-14-1988	47	38	Mb = 4.9, Mc = 4.7
86	03-10-1989	133	18	Mb = 5.3, Ms = 4.8, Mc = 5.0
87	04-25-1989	340	19	Mb = 6.3, Ms = 6.9, Mc = 6.5
88	11-02-1989	49	< 5	Mc = 4.9
89	01-29-1990	50	39	Mb = 5.4, Ms = 4.4, Mc = 5.1
90	04-16-1990	-	-	-
91	04-17-1990	-	-	-
92	04-19-1990	-	-	-
93	05-01-1990	-	-	-
94	05-03-1990	-	-	-
95	05-11-1990	180	12	Mb = 5.3, Ms = 4.9, Mc = 5.3
96	05-20-1990	-	-	-
97	05-29-1990	-	-	-
98	05-31-1990	171	16	Mb = 5.8, Ms = 5.9, Mc = 5.5
99	07-04-1990	110	5	Mb = 3.5, Mc = 4.3
100	08-22-1990	-	-	-
101	10-02-1990	-	-	-
102	10-20-1990	730	< 5	Mc = 4.1
103	10-23-1990	-	-	-
104	10-23-1990	-	-	-
105	10-26-1990	-	-	-
106	10-29-1990	81	< 5	Mb = 5.0, Mc = 5.0
107	01-14-1991	39	25	Mb = 5.3, Ms = 5.0, Mc = 5.1
108	01-15-1991	25	22	Mc = 4.7
109	01-17-1991	-	-	-
110	01-17-1991	31	23	Mb = 4.7, Mc = 4.8
111	01-30-1991	31	24	Mc = 4.4
112	04-09-1991	-	-	-
113	05-22-1991	120	< 5	Mb = 5.0, Ms = 4.6, Mc = 5.1

Tabla 2.2 – Características principales de los sismos en estudio



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del sismo	Distancia del epicentro a la presa (Km)	Profundidad focal (Km)	Magnitud Richter
114	10-29-1991	-	-	-
115	12-17-1991	-	-	-
116	01-12-1992	37	< 5	Mc = 4.3
117	02-12-1992	126	< 5	Mb = 5.1, Ms = 4.6, Mc = 4.4
118	02-14-1992	19	< 5	Mc = 4.2
119	02-14-1992	36	12	Mc = 4.7
120	02-29-1992	-	-	-
121	03-07-1992	-	-	-
122	03-15-1992	-	-	-
123	04-01-1992	123	18	Mb = 4.9, Mc = 4.5
124	04-11-1992	39	< 5	Mc = 4.3
125	07-24-1992	46	10	Mc = 4.5
126	08-21-1992	49*	< 5	Mb = 4.4*
127	08-27-1992	38	10	Mb = 4.0, Mc = 4.3
128	09-23-1992	25	< 5	Mc = 4.4
129	10-10-1992	40	26	Mc = 4.0
130	03-11-1993	61	12	Mb = 5.3, Mc = 5.1
131	03-31-1993	155	8	Mb = 5.3, Ms = 5.0, Mc = 5.3
132	08-20-1993	87	9	Mb = 4.2, Mc = 5.0
133	08-26-1993	141	27	Mb = 4.6, Mc = 4.9
134	08-27-1993	137	35	Mb = 4.7, Mc = 4.8
135	05-16-1994	-	-	-
136	05-23-1994	176	23	Mc = 5.6, Mw = 5.6, Mb = 5.8
137	05-23-1994	176	23	Mc = 5.6, Mw = 5.6, Mb = 5.8
138	08-22-1994	44	11	Mc = 4.5
139	10-18-1994	83	147	Mb = 4.8, Mc = 4.7
140	11-27-1994	83	80	Mc = 4.5
141	12-10-1994	68	20	Mc = 6.3
142	12-15-1994	77	92	Mc = 4.0
143	12-31-1994	42	6	Mc = 4.7
144	03-20-1995	-	-	-
145	04-27-1995	40*	36*	Mw = 5.2*
146	05-08-1995	501	< 5	Mc = 3.4
147	06-15-1995	-	-	-
148	09-14-1995	411	21	Mw = 7.3, Ms = 7.5
149	09-21-1995	78	83	Mc = 4.6
150	10-01-1995	-	-	-
151	10-09-1995	242	33	Mw = 7.9, ME = 7.5, Ms = 7.6
152	10-12-1995	221	24	Mc = 5.3

Tabla 2.2 – Características principales de los sismos en estudio



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del sismo	Distancia del epicentro a la presa (Km)	Profundidad focal (Km)	Magnitud Richter
153	01-25-1996	45	21	Mb = 5.3, Mc = 5.1
154	02-11-1996	39	54	Mc = 4.4
155	07-15-1996	126	20	Mc = 6.0
156	07-18-1996	118	20	Mc = 5.1
157	12-03-1996	92	14	Mc = 4.2
158	01-11-1997	92	16	Mb = 6.5, Ms = 6.9, Mc = 6.5
159	01-11-1997	91	16	Mc = 4.7
160	01-12-1997	37	14	Mc = 4.6
161	01-12-1997	45	8	Mc = 4.3
162	01-16-1997	62	25	Mc = 5.1
163	01-27-1997	52	23	Mc = 4.9
164	05-21-1997	71	16	Mb = 4.3, Mc = 4.6
165	05-22-1997	62	59	Mb = 5.9, Ms = 6.0
166	05-29-1997	64	27	Mb = 3.8, Mc = 4.4
167	10-12-1997	67	63	Mc = 4.5
168	10-25-1997	80	16	Mc = 4.3
169	12-22-1997	139	5	Mc = 4.6
170	02-27-1998	68	2	Mc = 4.4
171	03-13-1998	77	5	Mc = 4.7
172	04-20-1998	114	66	Mb = 5.9, Mc = 5.0, Ma = 5.5
173	05-09-1998	110	18	Mb = 4.8, Ms = 4.7, Mc = 4.8
174	06-27-1998	23	52	Mc = 4.1
175	01-07-1999	17	8	Mc = 4.1
176	02-22-1999	16	9	Mc = 4.1
177	03-03-1999	-	-	-
178	03-08-1999	-	-	-
179	04-02-1999	53	77	Mc = 4.2
180	04-29-1999	5	9	Mc = 4.0
181	06-15-1999	509	69	Me = 7.0, Mb = 6.4
182	06-21-1999	51	54	Mb = 6.0, Ms = 5.8, Mc = 5.8
183	06-22-1999	38	28	Mb = 4.9, Mc = 4.4
184	07-05-1999	58	12	Mb = 4.8
185	12-18-1999	87	208	Mc = 3.9
186	12-29-1999	55	82	Mb = 6.1, Ms = 5.4, Mc = 5.1, Me = 5.9
187	02-15-2000	30	25	Mc = 4.1
188	04-11-2000	49	10	Mc = 5.1, Mb = 5.0
189	05-14-2000	98	7	Mc = 4.7, Mb = 4.8
190	06-30-2000	99	5	Mc = 4.5, Mb = 4.4
191	07-12-2000	48	72	Mc = 3.9

Tabla 2.2 – Características principales de los sismos en estudio



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del sismo	Distancia del epicentro a la presa (Km)	Profundidad focal (Km)	Magnitud Richter
192	08-09-2000	51	16	Mb = 6.1, Ma = 6.5
193	08-09-2000	41	66	Mc = 4.6, Mb = 4.8
194	08-09-2000	36	6	Mc = 4.3
195	08-09-2000	37	9	Mc = 4.6, Mb = 4.7
196	08-09-2000	51	7	Mc = 4.6, Mb = 4.4
197	08-09-2000	39	24	Mc = 4.3
198	08-10-2000	46	7	Mc = 4.5, Mb = 4.3
199	08-13-2000	65	9	Mc = 4.4, Mb = 4.7
200	03-17-2001	34*	83*	Mc = 4.4*
201	04-26-2001	27*	44*	Mc = 4.3*
202	06-16-2001	70*	28*	Mb = 5.3*
203	07-06-2001	25*	33*	Mb = 3.8*
204	07-08-2001	-	-	-
205	07-13-2001	20*	70*	Mc = 4.1*
206	07-17-2001	-	-	-
207	08-10-2001	-	-	-
208	09-13-2001	35*	42*	Mb = 4.8*
209	09-22-2001	14*	13*	Mc = 3.9*
210	09-30-2001	16*	40*	Mc = 4.1*
211	10-08-2001	237*	10*	Mw = 5.9*
212	10-29-2001	230*	10*	Mc = 5.3*
213	04-28-2002	139*	25*	Mb = 4.7*
214	05-01-2002	27*	54*	Mc = 4.6*
215	06-05-2002	15*	23*	Mc = 4.2*
216	08-29-2002	43*	16*	Mc = 4.2*
217	09-21-2002	97*	60*	Mb = 5.0*
218	09-27-2002	175*	36*	Mb = 5.2*
219	10-22-2002	68*	33*	Mb = 3.9*
220	11-04-2002	82*	33*	Mb = 5.2*
221	12-10-2002	116*	85*	Mb = 5.1*
222	01-22-2003	237*	24*	Ms = 7.6*
223	01-22-2003	266*	10*	Mw = 6.2*

Tabla 2.2 – Características principales de los sismos en estudio

A manera de resumen, se presenta un acopio de los sismos más relevantes que se tienen en esta historia sísmica.



1. Sismo 4, acontecido el 30 de enero de 1973 a las 15:01 hrs. tiempo local (21:01 GMT), con epicentro localizado en 18.27°N y 102.88°O a 81 km de distancia de la presa, su hipocentro se dio a 43 km de profundidad en la parte continental del estado de Michoacán, tuvo una magnitud de 7.5° en la escala de Richter, y se asocio a un evento de mediana profundidad generado por la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Norteamericana.
2. Sismo 10, ocurrido a las 05:07 hrs. tiempo local (11:07 GMT) del 14 de marzo de 1979, cuyo epicentro se ubico en 17.49°N y 101.26°O , en la parte suroeste del estado de Guerrero a 115 km de distancia de la presa, muy cercano a la frontera continental con el Océano Pacífico, estuvo asociado a un foco de 49 km de profundidad, una magnitud Richter de 7.0° y al fenómeno de subducción entre la Placa de Cocos y la Placa Norteamericana.
3. Sismo 11, del 25 de octubre de 1981 ocurrido a las 21:22 hrs. tiempo local (03:22 GMT), cuyo epicentro se localizó en 17.88°N y 102.15°O a sólo 12 km de la presa José María Morelos en la parte continental del estado de Michoacán. Su hipocentro tuvo una profundidad de 33 km, su magnitud fue de 7.3° en la escala de Richter y también se asocio al fenómeno de subducción entre las placas de Cocos y la Norteamericana.
4. Sismo 29, con fecha del 19 de septiembre de 1985 y un horario de 07:17 hrs. tiempo local (13:17 GMT), su epicentro se ubico en el Océano Pacífico cerca de las costas de Michoacán en las coordenadas 18.08°N y 102.94°O a una distancia de 82 km de la presa José María Morelos. Fue de foco superficial con una profundidad de 15 km, magnitud igual a 8.1° Richter y producto también de la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana.
5. Sismo 69, ocurrido el 30 de abril de 1986 con una magnitud de 7.0° en la escala de Richter, su epicentro se ubico en el Pacífico Sur próximo a las costas de Michoacán en las coordenadas 18.02°N y 103.06°O a 94 km de la cortina de la presa José María Morelos. Su foco superficial fue de 20 km de profundidad y ocurrió a la 01:07 hrs. tiempo local (07:07 GMT), como consecuencia de la subducción de la Placa Oceánica de Cocos bajo la Placa Continental Norteamericana.
6. Sismo 87, ocurrido el 25 de abril de 1989 a las 08:29 hrs. tiempo local (14:29 GMT), de epicentro localizado en las aguas del Océano Pacífico cerca al estado de Guerrero en las coordenadas geográficas 16.60°N y 99.40°O a una distancia de 340 km de la presa en cuestión y correspondiente a una profundidad focal de 19 km. Tuvo una magnitud de 6.9° en la escala de Richter y como todos los eventos detallados en este resumen, también fue un sismo por subducción entre las placas de Cocos y la Norteamericana.
7. Sismo 141, con fecha del 10 de diciembre de 1994 y horario de las 16:17 hrs. tiempo local (22:17 GMT). Su epicentro se localizo en las coordenadas geográficas 18.02°N y 101.56°O a 68 km de la presa y correspondiente a una profundidad focal estimada de 20 km, alcanzo una magnitud de 6.3° en la escala de Richter y fue producto de la subducción entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana.



8. Sismo 148, efectuado el 14 de septiembre de 1995 a las 08:04 hrs. tiempo local (14:04 GMT), su epicentro se localizó en la región sureste del estado de Guerrero ya en la parte continental de la República, sus coordenadas fueron 16.79°N y 98.61°O y tuvo una distancia de 411 km hasta la presa. Su profundidad focal fue de 21 km, alcanzó una magnitud en la escala de Richter igual a 7.5° y también fue consecuencia del proceso de tectonismo entre la Placa de Cocos y la Placa Norteamericana.
9. Sismo 151, del 9 de octubre de 1995, que ocurrió a las 09:36 hrs. tiempo local (15:36 GMT), cuyo hipocentro fue localizado en el Océano Pacífico en las proximidades al estado de Colima, sus coordenadas geográficas fueron 18.70°N y 104.30°O y su profundidad estimada de 33 km. Presentó una magnitud igual a 7.6° Richter y su epicentro se dio a 242 km de la presa José María Morelos. Es uno más de los sismos asociados al movimiento entre las placas de Cocos y la Norteamericana.
10. Sismo 158, acontecido el 11 de enero de 1997 a las 14:28 hrs. tiempo local (20:28 GMT). El epicentro de este evento se localizó en las aguas del Océano Pacífico frente a las costas de Michoacán mediante las coordenadas 17.91°N y 103.04°O a 92 km de distancia de la presa José María Morelos, su foco tuvo una profundidad de 16 km aproximadamente, y su magnitud alcanzó los 6.9° en la escala de Richter. Fue producto también del fenómeno de subducción entre la Placa Oceánica de Cocos y la Placa Continental Norteamericana.
11. Sismo 181, cuya fecha fue el 15 de junio de 1999, tuvo una magnitud igual a 7.0° en la escala de Richter y un epicentro localizado en las cercanías de la ciudad de Tehuacan, Puebla, en las coordenadas 18.18°N y 97.51°O a 509 km de la presa José María Morelos y para el cual el hipocentro fue estimado a 69 km de profundidad. Ocurrió a las 15:42 hrs. tiempo local (21:42 GMT), como consecuencia del proceso de tectonismo de la Placa de Cocos, la cual es subducida por la placa Norteamericana en la dirección noreste.
12. Sismo 222, ocurrido el 22 de enero del 2003 a las 20:06 hrs. tiempo local (02:06 GMT) como consecuencia del proceso de subducción entre la Placa de Cocos y la Placa Norteamericana. Sus características fueron las siguientes, alcanzó una magnitud igual a 7.6° en la escala de Richter, su epicentro se localizó cerca de las costas de Colima en las coordenadas 18.77°N y 104.10°O a una distancia de 237 km de la presa en cuestión y tuvo una profundidad focal de 24 km.

La siguiente tabla resume la cantidad de sismos registrados en cuanto a su magnitud. De igual forma que para las coordenadas geográficas, en lo referente a la magnitud sólo pudo recabarse de las fuentes consultadas la información para 173 sismos.

Presa	Magnitud Richter						
	2 – 3	3 – 4	4 – 5	5 – 6	6 – 7	7 – 8	8 – 9
José María Morelos	2	13	94	45	10	8	1

Tabla 2.3 - Cantidad de sismos registrados por intervalo de magnitud



De acuerdo a la información presentada, se aprecia que el mayor porcentaje corresponde a los sismos de magnitud entre 4 y 5 grados (42.2%), seguido por los eventos con magnitudes comprendidas entre 5 y 6 grados (20.2%), mientras que los sismos con magnitud menor a 4 grados representan el 6.7% y los de magnitud mayor a 6 grados conforman el 8.5% del total. Siendo el 22.4% la cantidad de sismos para la cual no se cuenta con información sobre la magnitud.

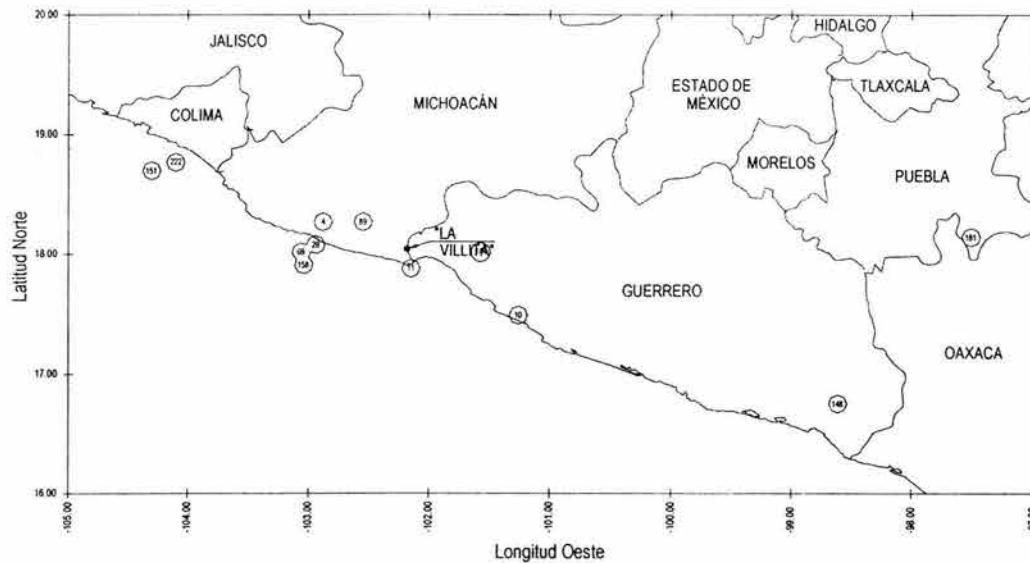


Figura 2.11 - Epicentros de los sismos más importantes

2.2.3 - ACCELERACIÓN EN ROCA

La tabla 2.4 muestra las aceleraciones máximas en las tres componentes de movimiento (vertical, longitudinal y transversal) de todos los acelerógrafos instalados en la cortina de la presa José María Morelos y que han sido provocadas por cada uno de los sismos que han actuado en dicha estructura. Debe aclararse que la mayoría de estos fenómenos sólo han sido registrados por algunos instrumentos.

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
1	01-02-1972	Mb = 6.2	B	25.42	-27.38	47.46
2	06-21-1972	-	C	9.26	-13.66	-18.00
3	07-21-1972	Ms = 4.8	B	9.27	14.29	-10.45
4	01-30-1973	Ms = 7.5	C	18.60	-63.27	-49.34
5	07-03-1973	Mb = 5.6	B	-7.49	-13.94	-10.72
6	10-17-1973	Mb = 4.7	C	0	29.37	-20.57
7	01-04-1975	Mb = 4.9	B	9.97	-6.22	10.82
			C	11.27	9.92	22.10
8	10-11-1975	Mo = 5.5	D	-32.02	0	-70.56
			B	-108.70	-80.10	-81.97
			C	115.69	85.28	342.83

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
9	11-15-1975	Mb = 5.9, Ms = 5.9	D	-28.32	-41.32	39.37
			B	-59.32	83.69	-84.89
			C	-72.91	73.30	209.30
10	03-14-1979	Mb = 7.0	D	-14.66	17.97	-16.67
			B	60.42	-124.30	-132.50
			C	-184.40	-155.00	371.20
11	10-25-1981	Mb = 6.1, Ms = 7.3	C	142.37	183.80	421.79
12	10-25-1981	Mb = 5.2*	B	-13.55	15.80	-19.90
			C	-11.80	28.54	49.21
13	10-25-1981	Mb = 4.5	B	-17.56	-18.23	-24.55
14	10-25-1981	Mb = 4.1*	B	12.20	-14.91	-10.59
15	10-30-1981	Mo = 4.1	C	-7.44	0	-8.24
16	11-01-1981	Mc = 5.5	C	18.51	15.83	32.25
17	11-11-1981	-	B	9.90	16.75	-17.57
			C	-6.64	0	12.08
18	12-29-1981	-	C	-6.32	-9.37	-14.15
19	12-30-1981	-	C	-16.57	-24.30	48.67
20	01-14-1982	Mo = 4.1	B	18.40	15.40	-18.56
21	12-08-1983	Mb = 5.5	C	-41.44	-32.40	98.80
22	05-28-1985	Mb = 5.2	I	-2.92	-6.76	9.16
			C	-12.59	-18.32	-10.12
23	-	-	-	-	-	-
24	06-02-1985	-	I	-6.36	-15.31	-8.91
			C	6.39	8.65	20.62
25	06-02-1985	-	C	5.31	9.44	-18.66
26	06-19-1985	Mb = 4.4	D	-6.59	5.57	-10.20
			C	-8.23	10.24	-20.93
27	07-26-1985	-	I	-4.74	8.52	8.28
28	08-26-1985	-	C	7.99	-10.39	19.74
29	09-19-1985	Mb = 6.8, Ms = 8.1, Mc = 8.1	E	58.40	122.54	-125.10
			C	-297.00	-305.00	697.61
30	09-19-1985	Mc = 4.3	C	7.01	-8.18	13.08
31	09-19-1985	-	C	7.78	-8.79	-18.71
32	-	-	-	-	-	-
33	09-21-1985	-	C	-8.40	-6.23	-15.00
34	09-21-1985	-	C	2.45	2.35	-5.97
35	09-21-1985	Mb = 3.5*	I	4.12	-8.73	-4.56
			C	-4.50	-7.63	14.00
36	09-21-1985	Mc = 3.1	C	1.59	1.79	-4.45
37	09-21-1985	-	C	-1.29	-2.77	3.54
38	09-21-1985	-	C	-4.38	5.57	-13.62
39	09-22-1985	-	C	-2.90	1.30	5.53

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
40	09-22-1985	Mc = 3.2	C	2.44	1.34	4.53
41	09-22-1985	-	C	1.16	1.95	4.04
42	09-22-1985	Mb = 4.1	C	1.51	1.82	-4.90
43	09-24-1985	Mb = 4.5	D	5.01	10.94	-11.54
			I	-11.42	9.37	-12.11
			C	16.33	19.10	35.60
44	09-24-1985	-	D	4.91	12.87	-15.62
			I	6.13	-13.59	11.96
			C	-9.26	-12.36	34.62
45	09-24-1985	Mb = 4.5	D	-4.30	-12.61	-15.18
			I	3.84	11.63	-10.41
			C	8.96	-18.54	-30.16
46	09-24-1985	Mb = 4.5	C	-11.42	17.65	32.53
47	09-24-1985	-	C	8.45	-11.93	-30.80
48	09-24-1985	Mb = 4.5	C	-8.15	-13.76	27.71
49	09-25-1985	Mb = 5.3	C	-3.90	-8.57	20.33
50	09-25-1985	Mb = 5.3	C	-5.45	-14.81	26.20
51	09-27-1985	Mb = 4.7	I	-4.03	-11.21	-9.62
			C	-8.88	-16.56	-28.63
52	10-02-1985	Mc = 3.6	I	4.06	6.40	5.82
53	10-03-1985	Mc = 3.4	C	3.04	3.99	-7.35
54	10-04-1985	Mc = 4.0	C	-1.64	-2.54	-5.02
55	10-29-1985	Mb = 5.6, Ms = 5.4, Mc = 5.1	I	0	-9.98	-18.33
			C	33.2	-50.26	142.08
56	10-29-1985	Mb = 5.6, Ms = 5.4, Mc = 5.1	C	18.17	-23.93	62.97
57	11-23-1985	-	C	8.72	-9.33	17.61
58	12-05-1985	Mb = 3.7, Mc = 4.4	C	-6.78	7.88	-20.54
59	12-10-1985	Mc = 3.6	C	4.01	4.31	11.96
60	12-23-1985	Mb = 4.5*	C	4.39	10.89	15.54
61	01-12-1986	Mb = 5.1, Mc = 4.7	I	-4.99	10.90	-10.11
			C	-8.20	14.92	-22.53
62	01-27-1986	Mc = 4.7	C	-2.92	-3.70	-17.03
63	01-27-1986	Mc = 4.7	C	5.44	-14.46	16.63
64	02-06-1986	Mc = 3.8	C	4.72	6.77	12.01
65	02-07-1986	Mb = 4.9, Mc = 4.7	C	-7.51	-11.66	20.58
66	02-07-1986	Mb = 4.9, Mc = 4.7	C	7.66	-11.68	16.80
67	02-10-1986	-	C	3.66	4.32	-8.94
68	03-18-1986	Mb = 4.6, Mc = 4.5	C	5.68	-6.80	-14.52
69	04-30-1986	Mb = 6.2, Ms = 7.0, Mc = 6.4	D	19.47	-25.71	-24.75
			I	-13.88	16.67	-17.16
			B	-22.72	-43.42	-32.69
			C	34.01	42.56	132.95

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
70	04-30-1986	Mb = 4.9*	C	-3.52	-5.93	-9.40
71	04-30-1986	Mb = 4.9*	C	3.92	-4.91	-13.23
72	05-05-1986	Mb = 5.6, Ms = 5.5, Mc = 5.6	I	8.53	20.53	-15.52
			C	-26.94	27.97	-60.52
73	06-19-1986	Mb = 5.2, Mc = 4.8	I	-9.62	19.89	17.73
			B	29.63	-24.65	28.42
74	11-04-1986	Mb = 4.8, Mc = 4.8	I	-11.34	-19.66	13.19
			C	-12.81	-19.59	46.33
75	11-26-1986	Mc = 5.0	C	7.95	-6.62	16.03
76	11-26-1986	Mc = 5.0	C	4.72	-5.35	-8.54
77	12-24-1986	Mb = 4.3*	D	6.18	20.57	12.67
			I	-5.70	-15.17	24.43
			C	-15.99	18.72	-40.51
78	12-24-1986	Mb = 4.3*	C	0	16.90	32.27
79	05-30-1987	-	C	-1.52	-4.24	9.40
80	07-26-1987	Mb = 5.0	C	-4.99	5.93	-11.51
81	08-29-1987	Mb = 4.2	C	2.70	-3.74	7.89
82	09-10-1987	Mc = 2.6	C	1.94	-4.13	9.80
83	11-07-1987	Mc = 2.7	C	-2.65	-5.27	11.04
84	02-08-1988	Mb = 5.5, Ms = 5.7, Mc = 5.0	I	-3.63	10.22	12.34
			T	-9.21	11.93	-19.22
			C	-10.05	13.50	22.53
85	09-14-1988	Mb = 4.9, Mc = 4.7	D	10.07	25.07	-22.61
86	03-10-1989	Mb = 5.3, Ms = 4.8, Mc = 5.0	C	4.79	-10.05	-13.88
			H	-5.74	-9.57	-9.57
87	04-25-1989	Mb = 6.3, Ms = 6.9, Mc = 6.5	C	-2.87	-5.26	-10.05
			G	-2.87	-12.44	-12.44
88	11-02-1989	Mc = 4.9	C	4.31	5.26	13.4
			G	-6.70	-9.57	-9.57
89	01-29-1990	Mb = 5.4, Ms = 4.4, Mc = 5.1	F	-18.18	22.49	21.05
			T	-21.05	26.80	26.80
			G	-26.8	36.37	36.37
			H	-5.74	11.48	11.48
90	04-16-1990	-	D	1.91	6.22	11.48
91	04-17-1990	-	D	1.91	-5.74	-11.96
92	04-19-1990	-	D	2.39	-8.13	-15.31
93	05-01-1990	-	D	-2.87	-5.74	10.05
94	05-03-1990	-	D	-2.39	-5.74	-10.53
95	05-11-1990	Mb = 5.3, Ms = 4.9, Mc = 5.3	2	4.79	13.88	10.53
			1	3.35	10.05	8.61
			G	-3.83	-13.4	-13.4
96	05-20-1990	-	D	-1.44	-5.26	10.05

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
97	05-29-1990	-	D	-12.44	-7.18	10.05
98	05-31-1990	Mb = 5.8, Ms = 5.9, Mc = 5.5	I	2.87	8.37	-5.26
			F	-10.05	-17.23	-17.23
			2	16.27	29.19	-30.63
			1	-9.57	-18.18	-18.66
			T	10.05	-22.97	-22.97
			C	12.44	27.75	-29.67
			G	-7.66	26.80	26.80
99	07-04-1990	Mb = 3.5, Mc = 4.3	T	4.31	8.13	8.13
			C	-5.74	7.66	9.57
			G	3.83	-9.57	-9.57
100	08-22-1990	-	D	-3.35	-5.74	10.05
101	10-02-1990	-	2	7.66	4.79	3.35
			C	5.74	-15.31	-15.31
102	10-20-1990	Mc = 4.1	D	-1.91	-4.79	10.05
103	10-23-1990	-	G	9.57	6.70	6.70
104	10-23-1990	-	D	2.87	5.26	-10.53
105	10-26-1990	-	D	-1.44	-6.22	11.48
106	10-29-1990	Mb = 5.0, Mc = 5.0	2	4.79	5.26	5.74
			1	9.57	3.83	4.79
			T	8.61	-7.18	-7.18
			C	9.57	-5.74	9.57
			H	-3.83	7.66	7.66
107	01-14-1991	Mb = 5.3, Ms = 5.0, Mc = 5.1	E	8.31	22.00	10.58
108	01-15-1991	Mc = 4.7	I	1.91	4.79	-6.70
			F	5.74	-4.79	-8.61
			2	5.74	7.18	8.61
			1	5.74	4.31	7.18
			T	-5.26	6.22	-9.09
			C	-7.66	-7.66	-15.31
			G	-6.70	-6.70	6.70
			H	-4.79	-5.74	7.66
109	01-17-1991	-	2	3.35	3.83	-3.35
			1	3.83	2.87	3.35
			C	2.87	6.70	9.57
110	01-17-1991	Mb = 4.7, Mc = 4.8	I	-3.35	6.22	7.18
			F	-6.70	5.74	8.61
			2	-9.57	-11.48	11.01
			1	-6.22	6.22	8.13
			T	6.22	-8.13	13.88
			C	8.61	-12.44	26.80
			G	7.66	-8.61	-21.05
H	-7.66	13.40	-18.18			

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
111	01-30-1991	Mc = 4.4	I	-2.15	4.55	-5.02
			2	5.26	5.74	-6.70
			1	8.13	3.35	-4.79
			T	8.13	-6.22	-7.18
			C	7.66	-7.66	-11.48
			H	-4.79	-5.74	8.61
112	04-09-1991	-	2	5.26	4.79	4.79
			1	5.74	2.87	3.35
			C	-3.83	-10.53	-15.31
113	05-22-1991	Mb = 5.0, Ms = 4.6, Mc = 5.1	2	-5.74	-5.74	6.22
			1	2.87	-2.87	4.79
			T	2.39	5.26	-6.22
			C	3.83	7.66	-8.61
114	10-29-1991	-	G	4.79	-1.91	8.13
115	12-17-1991	-	C	3.83	5.74	-9.57
116	01-12-1992	Mc = 4.3	C	-1.91	-3.83	7.66
			G	-3.35	-3.35	5.74
117	02-12-1992	Mb = 5.1, Ms = 4.6, Mc = 4.4	D	4.79	-9.57	7.66
			I	-5.26	-11.25	10.53
			B	9.57	-17.23	-17.23
			T	10.05	-14.83	-19.62
			C	14.36	-16.27	-38.28
			G	15.79	9.57	20.10
118	02-14-1992	Mc = 4.2	6	-5.74	8.61	6.22
			T	3.83	5.26	-6.70
			C	-7.66	-5.74	8.61
119	02-14-1992	Mc = 4.7	D	5.74	8.61	6.70
			I	3.59	-6.46	-8.61
			B	-5.74	12.44	9.57
			6	11.96	-18.18	11.96
			T	6.22	-6.70	14.83
			C	-8.61	9.57	22.97
120	02-29-1992	-	6	-13.88	5.26	-6.70
121	03-07-1992	-	6	11.01	5.26	7.18
122	03-15-1992	-	6	9.09	4.31	5.26
123	04-01-1992	Mb = 4.9, Mc = 4.5	6	12.44	-13.40	-10.05
			T	-3.83	7.18	-9.09
			C	4.79	-8.61	-14.36
124	04-11-1992	Mc = 4.3	6	7.66	-7.66	5.74
			C	4.79	7.66	-13.40

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
125	07-24-1992	Mc = 4.5	D	-1.91	6.70	-4.79
			I	1.67	5.74	-4.07
			T	3.83	-4.79	9.57
			C	3.83	-5.74	-14.36
126	08-21-1992	Mb = 4.4*	C	-3.83	-3.83	8.61
127	08-27-1992	Mb = 4.0, Mc = 4.3	D	-3.83	-8.61	-6.70
			I	-5.50	12.92	8.61
			T	8.61	10.05	23.45
			C	-9.57	-15.31	34.45
128	09-23-1992	Mc = 4.4	D	9.57	-19.14	8.61
			I	-5.98	6.70	-10.05
			T	-17.23	18.66	-19.62
			C	-16.27	22.01	-23.93
129	10-10-1992	Mc = 4.0	T	4.31	5.74	-9.57
			C	5.74	7.66	-13.40
130	03-11-1993	Mb = 5.3, Mc = 5.1	E	5.91	-6.21	-7.64
			D	10.53	18.18	17.23
			I	-17.71	29.19	32.54
			B	-29.67	-27.75	24.88
			F	-16.27	23.93	29.67
			T	-24.88	-30.63	49.29
			C	-29.67	-31.58	-62.21
131	03-31-1993	Mb = 5.3, Ms = 5.0, Mc = 5.3	B	-2.87	4.79	3.83
			F	-1.91	-2.87	-3.83
132	08-20-1993	Mb = 4.2, Mc = 5.0	T	-2.39	3.83	-6.22
			T	-1.44	2.39	-7.18
133	08-26-1993	Mb = 4.6, Mc = 4.9	B	-3.83	-4.79	5.74
			F	-2.87	3.83	-5.74
			T	-3.83	4.79	-6.22
134	08-27-1993	Mb = 4.7, Mc = 4.8	B	3.83	3.83	-6.70
			F	-2.87	3.83	6.70
			T	4.79	-6.22	-7.18
135	05-16-1994	-	D	2.35	5.82	3.42
136	05-23-1994	Mc = 5.6, Mw = 5.6, Mb = 5.8	B	-5.11	-6.93	5.97
			F	4.9	-7.66	-6.68
			P	6.13	7.78	9.34
137	05-23-1994	Mc = 5.6, Mw = 5.6, Mb = 5.8	B	-3.02	4.69	5.95
138	08-22-1994	Mc = 4.5	B	3.83	5.74	-7.66
			F	-5.74	3.83	-6.70
			P	5.34	4.70	6.04
139	10-18-1994	Mb = 4.8, Mc = 4.7	B	9.57	5.74	-5.74
			F	-6.70	-3.83	-4.79

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
140	11-27-1994	Mc = 4.5	B	-3.83	5.74	3.83
141	12-10-1994	Mc = 6.3	E	14.67	23.53	17.37
			D	23.92	47.92	33.22
			I	27.28	-45.94	38.28
			B	-47.85	-52.64	58.38
			F	45.94	-48.81	-59.34
			P	39.10	61.14	79.81
			T	44.14	52.10	88.14
142	12-15-1994	Mc = 4.0	B	-2.87	5.74	-2.87
143	12-31-1994	Mc = 4.7	D	4.21	17.23	-3.92
			I	-2.87	9.57	-5.74
			B	-5.74	10.53	-8.61
			F	4.79	5.74	5.74
			P	9.05	-6.10	-8.29
			T	5.76	6.25	9.35
144	03-20-1995	-	D	9.39	-24.17	-14.61
			B	-8.61	12.44	-14.36
			F	-10.53	12.44	-18.18
			P	11.03	17.33	-13.38
			T	-11.02	-22.03	22.03
145	04-27-1995	Mw = 5.2*	D	-6.61	-12.59	11.30
			I	7.18	-14.83	13.40
			B	14.36	21.05	-19.14
			F	-10.47	16.49	16.16
			P	13.54	-18.08	-29.70
			T	-23.48	-17.01	31.56
146	05-08-1995	Mc = 3.4	B	-3.83	-5.74	-5.74
147	06-15-1995	-	I	-2.87	5.74	8.13
			F	-3.83	2.87	4.79
148	09-14-1995	Mw = 7.3, Ms = 7.5	P	2.02	5.74	3.13
			T	1.44	-2.39	6.70
149	09-21-1995	Mc = 4.6	P	3.96	2.90	4.12
			T	2.87	-2.87	5.26
150	10-01-1995	-	I	-2.87	-6.70	-3.35
			B	-2.87	6.70	3.83
151	10-09-1995	Mw = 7.9, ME = 7.5, Ms = 7.6	D	3.91	-5.59	4.44
			I	2.87	3.35	-5.26
			B	5.74	10.53	-12.44
			F	-5.74	-7.66	12.44
			P	-10.01	16.21	-16.57
			T	6.22	12.92	19.62

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
152	10-12-1995	Mc = 5.3	B	-2.87	3.83	-4.79
			F	-3.83	-3.83	-5.74
			P	3.84	9.87	-6.63
153	01-25-1996	Mb = 5.3, Mc = 5.1	E	-14.42	-16.27	28.71
			D	33.77	62.05	37.99
			I	-40.67	-88.53	-66.99
			B	-58.38	84.22	-90.92
			F	-5.74	-7.66	11.48
			P	49.24	-95.26	112.08
154	02-11-1996	Mc = 4.4	T	71.84	-78.56	124.57
			D	-3.10	-7.57	-3.06
			I	-3.35	6.22	-5.26
			B	-8.61	-7.66	-6.70
			F	-4.79	3.83	-5.74
			P	4.85	-5.66	8.62
155	07-15-1996	Mc = 6.0	T	-6.70	7.19	7.19
			D	-6.82	-11.49	-9.81
			I	-6.70	14.36	14.83
			B	-14.29	-27.03	28.86
			F	-17.23	-20.10	-27.75
156	07-18-1996	Mc = 5.1	P	21.77	-40.88	-43.42
			T	-14.27	32.33	-56.25
			I	5.26	7.66	-6.22
			B	-5.79	8.44	8.78
157	12-03-1996	Mc = 4.2	F	5.86	5.78	-9.77
			P	-12.32	11.24	-13.80
			T	-5.86	-9.45	-14.55
			B	2.94	4.82	-5.39
158	01-11-1997	Mb = 6.5, Ms = 6.9, Mc = 6.5	E	70.82	99.50	-103.30
			D	147.60	172.18	-124.60
			I	-80.81	174.70	-163.60
			B	-124.40	183.84	132.19
			F	-136.80	-139.60	144.80
			C	188.05	-169.3	-624.5
159	01-11-1997	Mc = 4.7	D	2.02	-6.05	2.62
160	01-12-1997	Mc = 4.6	D	-3.11	-10.97	3.40
			B	4.76	4.34	4.56
			C	4.88	-4.01	14.66
161	01-12-1997	Mc = 4.3	D	2.79	8.36	-5.14
			I	-2.08	7.71	4.50
			B	3.84	-5.13	-5.03
			F	4.58	-3.65	4.36

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
162	01-16-1997	Mc = 5.1	D	10.68	34.07	-12.04
			I	-5.83	10.60	9.73
			B	16.34	23.97	16.28
			F	19.40	20.17	18.21
			T	-18.55	-16.29	-32.69
			C	-15.75	19.15	49.98
163	01-27-1997	Mc = 4.9	D	-1.97	7.41	-4.03
			B	6.73	4.67	7.49
			F	-3.84	6.63	4.85
			T	-6.55	8.62	12.45
			C	-7.50	8.58	15.89
164	05-21-1997	Mb = 4.3, Mc = 4.6	E	-2.67	-3.59	-3.59
			D	-2.87	4.88	4.96
			I	1.99	-6.08	-6.88
			B	-7.43	9.05	7.73
			F	8.52	-7.72	-8.73
			T	-8.72	-9.44	17.27
			C	10.38	-14.74	22.01
165	05-22-1997	Mb = 5.9, Ms = 6.0	E	-22.12	25.53	25.53
			D	39.55	72.82	-39.15
			I	39.72	80.86	-66.99
			B	-91.49	129.33	-96.76
			F	-59.31	102.22	81.94
			T	81.40	96.28	-191.60
			C	-149.50	-145.60	-496.40
166	05-29-1997	Mb = 3.8, Mc = 4.4	E	-1.55	1.67	1.67
			D	-1.98	-7.11	4.32
			I	-2.30	-6.42	-4.81
			B	-5.07	-8.44	-6.56
			F	-5.90	4.63	6.90
			T	-4.56	-4.85	-9.92
			C	6.12	6.00	-22.86
167	10-12-1997	Mc = 4.5	D	2.40	-4.60	4.86
			I	-1.95	-5.60	-5.28
			B	-4.98	-7.66	-8.62
			F	2.95	-3.37	3.40
			T	5.37	-8.93	-16.54
			C	-6.79	11.08	-22.11
168	10-25-1997	Mc = 4.3	E	-1.21	0.90	0.90
169	12-22-1997	Mc = 4.6	F	-3.11	-4.20	-5.44
			C	-4.84	8.57	-10.67

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
170	02-27-1998	Mc = 4.4	I	2.41	-3.17	-5.14
			B	-2.87	5.72	3.93
			F	-3.29	5.95	5.65
			C	-5.39	9.06	13.68
171	03-13-1998	Mc = 4.7	F	-3.36	2.95	4.21
			C	-1.65	2.86	14.09
172	04-20-1998	Mb = 5.9, Mc = 5.0, Ma = 5.5	E	2.92	3.13	3.13
			D	4.30	-7.41	-5.72
			I	-5.07	-6.85	-9.25
			B	-13.45	-11.52	11.78
			F	-11.21	-12.11	11.52
173	05-09-1998	Mb = 4.8, Ms = 4.7, Mc = 4.8	C	-13.83	19.11	-27.19
			E	-1.95	-1.84	-1.84
			D	-2.25	4.39	4.56
			I	-3.30	-6.59	-6.17
			B	-5.17	9.53	-9.36
			F	-5.76	7.04	-8.93
174	06-27-1998	Mc = 4.1	C	-5.41	12.22	17.16
			E	4.82	-2.84	-2.84
			T	9.10	28.74	-15.81
175	01-07-1999	Mc = 4.1	C	12.15	-12.05	24.13
			C	-3.29	4.80	5.90
176	02-22-1999	Mc = 4.1	E	1.03	2.85	2.85
			I	-1.29	-5.69	5.48
			C	-3.83	3.35	9.96
177	03-03-1999	-	C	-1.81	2.39	-6.23
178	03-08-1999	-	C	1.81	-2.38	4.72
179	04-02-1999	Mc = 4.2	T	1.77	-3.48	5.74
			C	4.31	-4.31	8.62
180	04-29-1999	Mc = 4.0	I	2.07	-4.87	5.90
			F	-2.43	-3.81	5.74
			T	3.80	-2.73	9.25
			C	2.87	5.27	-11.83
181	06-15-1999	Me = 7.0, Mb = 6.4	B	-1.88	-3.67	-5.26
			T	-2.40	6.59	9.58
			C	2.68	8.33	11.68
182	06-21-1999	Mb = 6.0, Ms = 5.8, Mc = 5.8	E	22.77	30.34	30.34
			D	42.17	-46.31	-48.07
			I	34.01	-50.77	52.69
			B	-74.52	-80.94	82.39
			F	-63.21	88.13	-80.09
			T	79.52	-88.53	-116.40
			C	-85.85	-108.50	-147.00

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
183	06-22-1999	Mb = 4.9, Mc = 4.4	E	3.11	-4.24	-4.24
			D	-6.65	-11.02	8.03
			I	-9.69	11.50	9.58
			B	-12.04	14.51	-17.24
			F	-8.28	-6.71	-12.12
			T	-11.56	14.78	18.20
			C	10.54	16.85	28.23
184	07-05-1999	Mb = 4.8	B	-4.67	-7.67	-5.06
			T	-5.58	6.33	-8.46
185	12-18-1999	Mc = 3.9	I	2.32	-5.94	6.69
			F	-3.89	1.93	-4.79
			C	5.19	4.09	-12.27
186	12-29-1999	Mb = 6.1, Ms = 5.4, Mc = 5.1, Me = 5.9	E	8.82	12.70	12.70
			I	24.91	-34.01	-21.56
			F	28.74	43.12	-53.64
			C	45.98	56.69	-110.70
187	02-15-2000	Mc = 4.1	C	-2.39	3.00	5.48
188	04-11-2000	Mc = 5.1, Mb = 5.0	I	-6.35	21.50	12.03
			B	13.89	22.98	13.78
			F	14.36	-16.63	12.45
			T	-14.83	15.49	28.97
			C	-14.36	27.00	34.49
189	05-14-2000	Mc = 4.7, Mb = 4.8	B	-2.20	3.86	-4.08
			C	3.36	-4.51	-8.01
190	06-30-2000	Mc = 4.5, Mb = 4.4	D	2.64	3.54	5.35
			B	3.13	-5.70	-6.50
			C	6.31	-7.74	-16.43
191	07-12-2000	Mc = 3.9	C	1.44	-1.92	4.30
192	08-09-2000	Mb = 6.1, Ma = 6.5	D	-69.91	-146.70	-81.73
			I	-50.81	-96.76	85.44
			B	75.20	-95.80	-93.39
			F	-80.47	-107.20	-91.01
			T	105.91	131.12	-126.80
			C	110.18	-163.30	262.01
193	08-09-2000	Mc = 4.6, Mb = 4.8	D	2.88	9.30	5.36
			I	3.39	-7.67	-4.96
			F	6.72	7.66	-6.71
			T	-6.61	-8.83	11.15
			C	6.77	10.54	15.81
194	08-09-2000	Mc = 4.3	C	3.91	-2.90	-4.76

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
195	08-09-2000	Mc = 4.6, Mb = 4.7	D	-4.12	-10.89	-6.17
			I	3.22	-6.79	-5.56
			F	-9.58	-5.75	8.62
			C	-8.58	-10.53	20.60
196	08-09-2000	Mc = 4.6, Mb = 4.4	D	2.55	7.37	-4.24
			I	-2.07	-5.82	-5.03
			C	5.34	6.22	11.50
197	08-09-2000	Mc = 4.3	C	4.45	-4.31	-6.23
198	08-10-2000	Mc = 4.5, Mb = 4.3	D	-3.24	8.65	-4.86
			I	-2.47	6.63	5.49
			C	-5.27	-8.14	-10.06
199	08-13-2000	Mc = 4.4, Mb = 4.7	C	-2.41	2.39	4.79
200	03-17-2001	Mc = 4.4*	C	-2.31	-4.75	-2.71
			B	-3.19	2.64	-6.16
			T	-4.57	-4.23	-8.06
201	04-26-2001	Mc = 4.3*	I	1.71	6.73	7.00
			B	3.78	-5.16	-7.06
			T	6.06	6.62	11.54
			C	6.23	6.74	-11.41
202	06-16-2001	Mb = 5.3*	D	6.85	-17.26	7.73
			I	6.10	-9.98	11.91
			B	-12.62	22.03	-12.93
			F	13.50	-13.41	20.12
			T	13.85	17.72	-30.19
			C	14.36	23.95	-42.07
203	07-06-2001	Mb = 3.8*	D	-2.69	-11.36	4.08
			I	1.57	7.32	-4.21
			B	-7.20	9.41	5.60
			F	-9.58	-5.74	7.66
			T	6.31	6.30	-8.46
			C	6.22	8.62	-11.87
204	07-08-2001	-	I	-2.37	6.25	-3.80
			F	-3.83	-2.87	-2.87
			C	4.28	-3.82	8.70
205	07-13-2001	Mc = 4.1*	D	-17.30	-23.63	-12.82
			I	-21.07	-15.84	14.00
			B	-17.72	-9.09	10.54
			F	-14.58	-7.70	7.69
			T	-23.50	-9.58	-12.45
C	-26.13	-13.86	35.54			

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



Capítulo II - Sismicidad

# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
206	07-17-2001	-	D	-4.60	11.12	-8.83
			I	4.03	-11.80	-13.16
			B	-6.00	6.00	-5.52
			F	-5.59	3.84	6.57
			T	-7.09	5.62	-6.96
			C	-6.55	-10.02	-12.41
207	08-10-2001	-	C	2.40	2.44	-5.60
208	09-13-2001	Mb = 4.8*	I	2.04	5.68	-3.50
			B	-6.23	8.63	5.27
			F	-5.77	7.21	5.74
			T	-6.67	-7.24	-9.27
			C	-8.02	8.50	12.59
209	09-22-2001	Mc = 3.9*	B	-2.96	-4.79	3.77
			C	2.80	-4.16	-7.95
210	09-30-2001	Mc = 4.1*	B	-4.04	-4.34	-3.57
			F	2.77	2.84	-3.68
			C	-6.45	-4.44	-6.05
211	10-08-2001	Mw = 5.9*	B	2.40	2.37	-3.86
			T	2.89	4.91	7.98
			C	3.37	5.21	9.38
212	10-29-2001	Mc = 5.3*	C	1.02	1.73	-5.08
213	04-28-2002	Mb = 4.7*	D	0.97	1.52	-2.52
			T	0.97	1.52	-2.52
214	05-01-2002	Mc = 4.6*	D	-7.04	11.27	14.40
			I	-12.72	-9.56	-14.59
			B	18.18	-16.32	-18.20
			F	-21.89	-13.39	-20.30
			T	-25.95	14.97	33.15
215	06-05-2002	Mc = 4.2*	C	24.44	18.24	-37.45
			C	2.29	-3.38	6.71
216	08-29-2002	Mc = 4.2*	B	-3.49	8.68	-5.29
			T	4.79	-4.77	-7.66
			C	-4.31	-8.03	-12.66
217	09-21-2002	Mb = 5.0*	C	2.39	-3.70	-6.32
218	09-27-2002	Mb = 5.2*	C	-1.65	-2.10	5.50
219	10-22-2002	Mb = 3.9*	T	2.94	-3.46	4.53
			C	2.86	3.89	4.42
220	11-04-2002	Mb = 5.2*	D	-1.23	-2.05	2.05
			I	-1.33	-1.62	-1.98
			B	2.68	-4.80	5.68
			T	-2.68	5.11	-9.76
			C	-3.32	-5.96	11.51

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina



# Sismo	Fecha del Sismo	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm / s ²)		
				Vert.	Long.	Trans.
221	12-10-2002	Mb = 5.1*	D	-1.57	3.24	-2.62
			I	3.04	-4.90	3.82
			B	-3.26	4.53	-5.92
			F	3.83	-4.43	-4.51
			T	-3.47	7.48	-9.45
			C	-3.83	-7.01	11.72
222	01-22-2003	Ms = 7.6*	D	9.61	-15.25	-11.19
			I	6.36	-10.85	-14.52
			B	-17.21	20.49	-22.98
			T	-13.96	-39.30	45.43
			C	-18.20	42.26	-58.21
223	01-22-2003	Mw = 6.2*	T	1.2	-2.85	-3.45

Tabla 2.4 – Aceleraciones máximas registradas en la cortina

- | | |
|--|--|
| 1 Núcleo elevación 35 cadenamiento 0+270 | 2 Núcleo elevación 49.5 cadenamiento 0+270 |
| 6 Inclinómetro 6 elevación 30 cadenamiento 0+383 | B Base cortina elevación 13.5 cadenamiento 0+220 |
| C Corona elevación 60 cadenamiento 0+220 | D Margen derecha |
| E Margen derecha | F Base cortina elevación 13.5 cadenamiento 0+355 |
| G Aguas abajo elevación 60 cadenamiento 0+355 | H Aguas arriba elevación 60 cadenamiento 0+355 |
| I Margen izquierda | P Inclinómetro P |
| T Corona elevación 60 cadenamiento 0+220 (testigo) | |

El objetivo de presentar esta información es determinar las zonas de la cortina donde se han manifestado las aceleraciones máximas en la componente longitudinal de los movimientos, por lo que se considero desglosar dicha información de la siguiente manera para conocer estas zonas.

En primer lugar, es importante destacar que 104 de los 223 sismos considerados, han sido registrados sólo por una de las estaciones instaladas en la cortina, hecho que impide analizar los efectos de cada uno de estos eventos en todas las regiones de la estructura. Aun así, de estos registros se observa que la mayoría de las aceleraciones máximas en la componente longitudinal, tuvieron valores aproximados o menores a los 15 cm/s², y estuvieron asociadas a sismos con magnitudes comprendidas entre 4 y 6 grados Richter.

Para estos 104 sismos fueron detectados como valores máximos de aceleración en la componente longitudinal, aquellos de 27.38, 183.80 y 25.10 cm/s², registrados por las estaciones B, C y D respectivamente y aunque estos valores no son los máximos, permiten inferir que los movimientos mas intensos en dicha componente han ocurrido en orden de importancia en la corona (acelerógrafo C), en la base de la cortina (acelerógrafo B) y en la margen derecha (acelerógrafo D).

Para los sismos que han sido registrados por dos estaciones o más, se observó un comportamiento similar al anterior, debido a que las aceleraciones máximas de la componente longitudinal se han presentado en las regiones monitoreadas por las estaciones B, C, D e I, mismas que se encontraron mayormente afectadas en el caso anterior e incluso la margen izquierda (acelerógrafo I).



La aceleración máxima en la componente longitudinal de todas las estaciones de la cortina corresponde a la producida por el sismo del 19 de septiembre de 1985, que particularmente en la estación de la corona registró una aceleración de 305 cm/s^2 . Dicha estación ha captado un total de 159 sismos, de los cuales 47 han provocado en esa región las aceleraciones máximas en la componente longitudinal, observándose que los eventos sísmicos 10, 11, 158, 165, 182 y 192, además del ya citado, fueron los desencadenantes de los movimientos más intensos.

El segundo valor de aceleración más alto fue registrado por el acelerógrafo B y alcanzó los 183.84 cm/s^2 como consecuencia del sismo del 11 de enero de 1997. Este acelerógrafo ha registrado un total de 74 eventos sísmicos de los cuales 16 han ocasionado que en dicha estación se desarrollen los movimientos longitudinales máximos, siendo en este caso los sismos 8, 9, 10, 141, 153, 158 y 165, donde ya está incluido el mencionado anteriormente, los que provocaron las aceleraciones más altas.

La margen izquierda también ha sido de las regiones más afectadas de la estructura, en ella se han registrado, mediante el acelerógrafo I, un total de 70 sismos, 11 de ellos provocaron que en dicha región se manifestaran las aceleraciones máximas en la componente longitudinal, incluyendo una de 174.70 cm/s^2 producida por el sismo del 11 de enero de 1997, que corresponde al tercer valor más elevado. Otros sismos que provocaron movimientos intensos en la estación I fueron los descritos en la tablas 2.2 y 2.4 por los números 141, 153, 165, 182 y 192.

De igual forma, la margen derecha ha soportado valores de aceleración elevados, el más alto de ellos fue igual a 172.18 cm/s^2 y provocado por el sismo del 11 de enero de 1997, además han sido registrados 65 eventos sísmicos mediante el acelerógrafo D, de los cuales 12 generaron en esa región los movimientos longitudinales máximos. En esta ocasión fueron los eventos 141, 153, 165, 182 y 192, además del ya citado, los que produjeron valores de aceleración elevados.

El último caso importante de este análisis corresponde al de las estaciones "P" y "T". La primera de ellas registró un total de 14 sismos, siendo 7 los que provocaron en dicha estación los movimientos longitudinales máximos, la segunda produjo un total de 65 registros, de los cuales 7 pertenecen a sismos que causaron el mismo efecto para el movimiento longitudinal. Las aceleraciones máximas, registradas en dichas estaciones, fueron producto de los sismos del 25 de enero de 1996 y del 9 de agosto del 2000, alcanzando valores de 95.26 y 131.12 cm/s^2 respectivamente, y los sismos más impactantes sobre estas zonas fueron los 141 y 155 (estación "P") y 141, 153, 165 y 182 (estación "T"), además de los ya citados.

Los demás acelerógrafos distribuidos en la cortina registraron movimientos longitudinales bastante más bajos que los expuestos en los casos anteriores, solamente destacan los producidos por las aceleraciones de 122.54 y 139.60 cm/s^2 , registradas en los acelerógrafos E y F como consecuencia de los sismos del 19 de septiembre de 1985 y del 11 de enero de 1997 y con los cuales se desarrollaron movimientos mayores en las estaciones C y B respectivamente. De tal forma que para los fines de este análisis las zonas donde se encuentran los acelerógrafos 1, 2, 6, G y H fueron las menos afectadas por los eventos sísmicos.



Est.	Principales Eventos Sísmicos													
	8 5.5° cm/s ²	9 5.9° cm/s ²	10 7.0° cm/s ²	11 7.3 cm/s ²	29 8.1° cm/s ²	69 7.0° cm/s ²	141 6.3° cm/s ²	153 5.3° cm/s ²	158 6.9° cm/s ²	165 6.0° cm/s ²	182 6.0° cm/s ²	186 6.1° cm/s ²	192 6.5° cm/s ²	222 7.6° cm/s ²
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	80.10	83.69	124.30	-	-	43.42	52.64	84.22	183.84	129.33	80.94	-	95.80	20.49
C	85.28	73.30	155.00	183.80	305.00	42.56	-	-	169.30	145.60	108.50	56.69	163.30	42.26
D	-	41.32	17.97	-	-	25.71	47.92	62.05	172.18	72.82	46.31	-	146.70	15.25
E	-	-	-	-	122.54	-	23.53	16.27	99.50	25.53	30.34	12.70	-	-
F	-	-	-	-	-	-	48.81	7.66	139.60	102.22	88.13	43.12	107.20	-
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I	-	-	-	-	-	16.67	45.94	88.53	174.70	80.86	50.77	34.01	96.76	10.85
P	-	-	-	-	-	-	61.14	95.26	-	-	-	-	-	-
T	-	-	-	-	-	-	52.10	78.56	-	96.28	88.53	-	131.12	39.30

Tabla 2.5 Aceleraciones máximas en la componente longitudinal en la presa José María Morelos

La comparación de los valores presentados en la tabla 2.5 y el análisis detallado en los párrafos anteriores, permiten concluir que los máximos niveles de aceleración en la componente longitudinal se han manifestado en la corona, en la zona monitoreada por los acelerógrafos C y T, y como consecuencia de los sismos del 11 de octubre de 1975 (85.28 cm/s²), 14 de marzo de 1979 (155 cm/s²), 25 de octubre de 1981 (183.80 cm/s²), 19 de septiembre de 1985 (305 cm/s²), 22 de mayo de 1997 (145.60 cm/s²), 21 de junio de 1999 (108.50 cm/s²), 29 de diciembre de 1999 (56.69 cm/s²), 9 de agosto del 2000 (163.30 cm/s²) y 22 de enero del 2003 (42.26 cm/s²).

Aunque estas aceleraciones son mayores que las registradas en los acelerógrafos B y F de la base de la cortina (excepto por los sismos 9, 69 y 158), se entiende que esta región también sufrió movimientos longitudinales importantes. Respecto a las márgenes de la estructura se observó que algunos eventos provocaron movimientos considerables aunque a menor escala que para las estaciones ya citadas y finalmente los registros de los acelerógrafos 1, 2, 6, G y H con los que se da seguimiento al comportamiento de las zonas central y próxima a la margen derecha, no presentaron valores de aceleración elevados de manera que estas fueron las regiones menos afectadas por los sismos en estudio.

En cuanto a las aceleraciones registradas en la estación del centro de la corona, debe citarse que estudios previos (Prince, 1986, Alcántara, 1993), cuyo objetivo era explicar los altos valores y características de los acelerogramas obtenidos en ella, arrojaron como resultado la recomendación de construir la estación testigo, dado que se concluyó la existencia de movimientos relativos entre la caseta y la cortina, cuando se excedía una aceleración máxima en la corona del orden de 0.15g.



2.2 – ESPECTROS DE RESPUESTA DE LOS SISMOS REGISTRADOS EN ROCA

El concepto básico para definir un espectro de respuesta se basa en la oscilación de una partícula en torno a un punto de equilibrio, motivada por la acción combinada de inercia (por su masa), de disipación de energía (por su amortiguamiento), de almacenamiento de energía potencial y de 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 y se vuelve importante conocer la historia de movimientos de cada una de las partículas, lo cual conduce a variaciones tanto en desplazamientos, como en velocidades y aceleraciones, que dependerán de las fuerzas externas y de las características de los materiales.

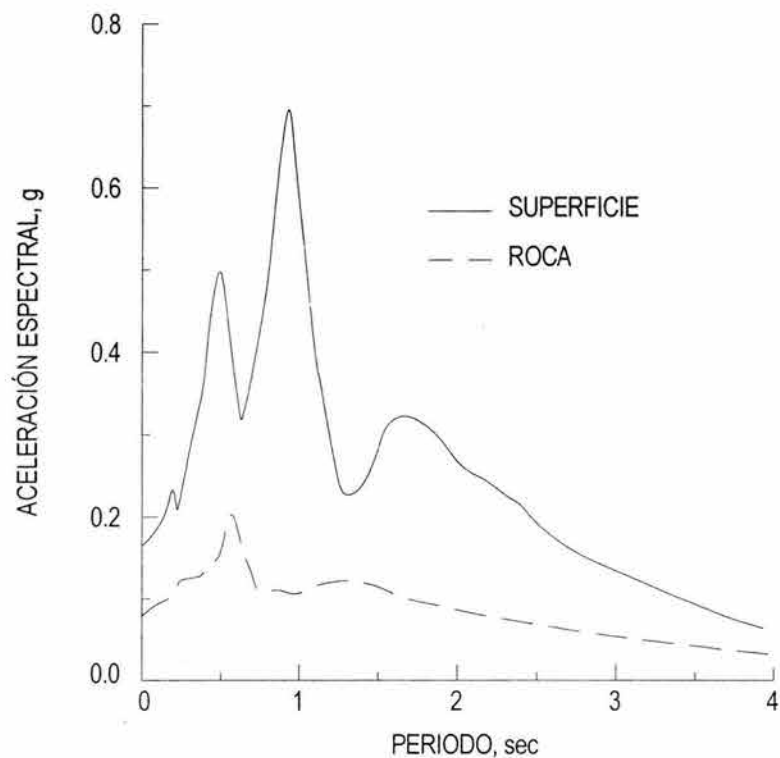


Figura 2.12 – Espectro de respuesta

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 mediante velocidades, desplazamientos o aceleraciones. La abscisa del espectro de respuesta es la frecuencia de vibración (o el periodo) del sistema y la ordenada la máxima respuesta.

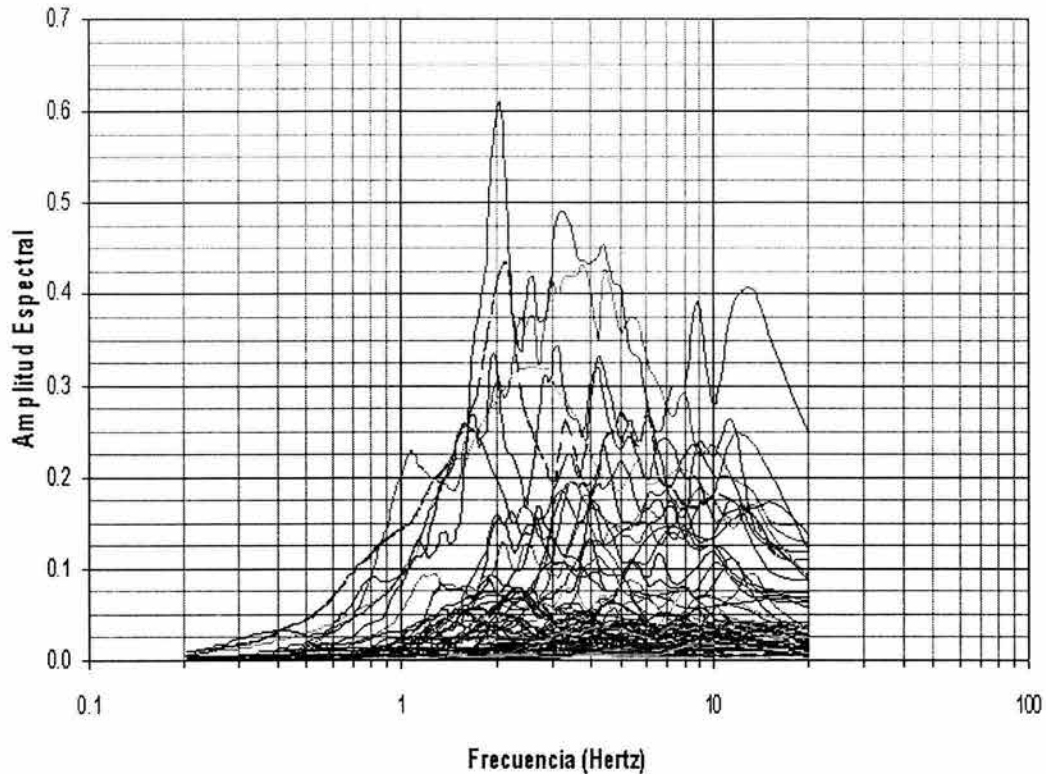


Figura 2.13 - Espectro de respuesta en la base de la cortina (Acelerógrafo B).

En el espectro de respuesta registrado en la base de la cortina, mediante el acelerógrafo B, se observa que los sismos desarrollaron un comportamiento común para una frecuencia próxima a 2.0 Hz, en la cual se manifestó el valor de amplitud espectral máximo (0.61) con el evento sísmico 158 detallado en las tablas 2.2 y 2.4. Respecto a la energía asociada a este espectro, se observa que ésta se concentró entre 0.8 y 20.0 Hz, y se limitó por un valor de amplitud espectral promedio de 0.15. Otro aspecto visible en la figura es que varios de los eventos sísmicos registrados, incluyendo el citado anteriormente, provocaron excitaciones en la estructura para otras frecuencias, pues como se observa para 3.2, 4.5, 8.9 y 13.3 Hz aproximadamente se presentaron valores de amplitud elevados.

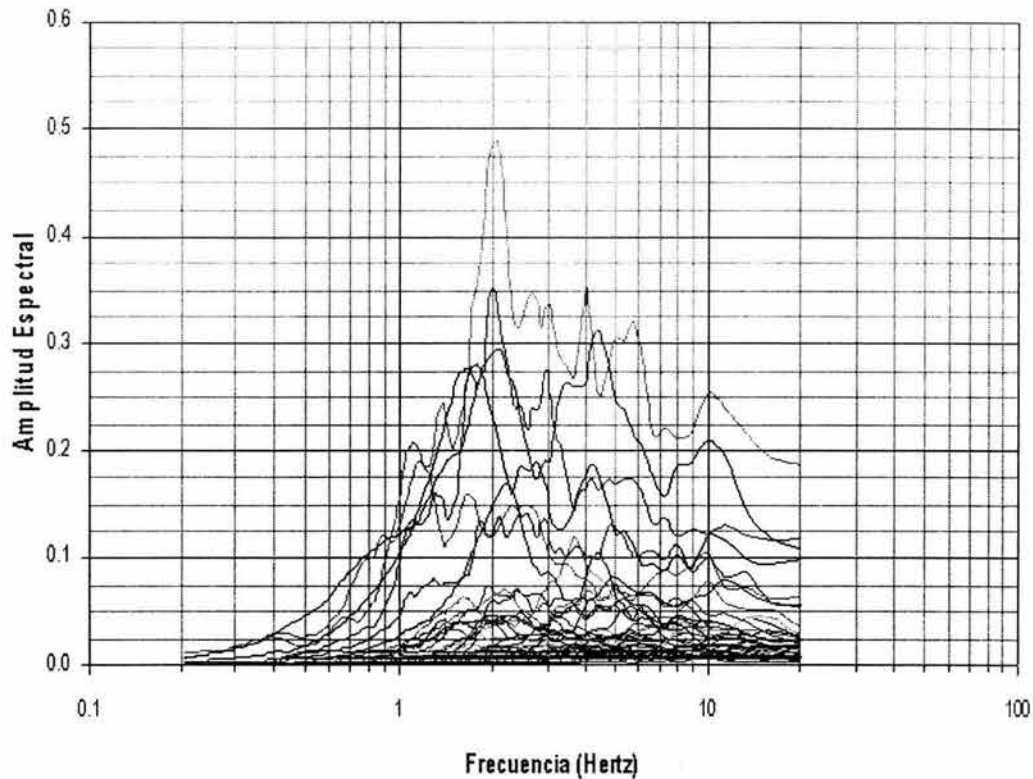


Figura 2.14 - Espectro de respuesta en la base de la cortina (Acelerógrafo F).

Para obtener un mejor análisis de la base de la estructura se cuenta con un acelerógrafo localizado sobre la ataguía de aguas abajo a 13.5 m de elevación y sobre el enrocamiento, que a diferencia del referido en la figura 2.13 se aproxima más a la margen derecha de la cortina. Este acelerógrafo registró los sismos que se presentan en la figura 2.14, observándose que el comportamiento de dichos eventos se manifestó común para una frecuencia cercana a 2.0 Hz y en la cual se obtuvo el valor de amplitud espectral máximo (0.5) como consecuencia del sismo 158. En relación a la energía asociada a este espectro, se observa en la figura, que ésta se agrupo entre 0.6 y 20.0 Hz y se limitó por una amplitud espectral promedio de 0.10. También se observa que algunos sismos causaron para otras frecuencias diferentes a la característica, excitaciones en esta región de la estructura, al alcanzar valores de amplitud destacados para 3.0 y 4.0 Hz aproximadamente.

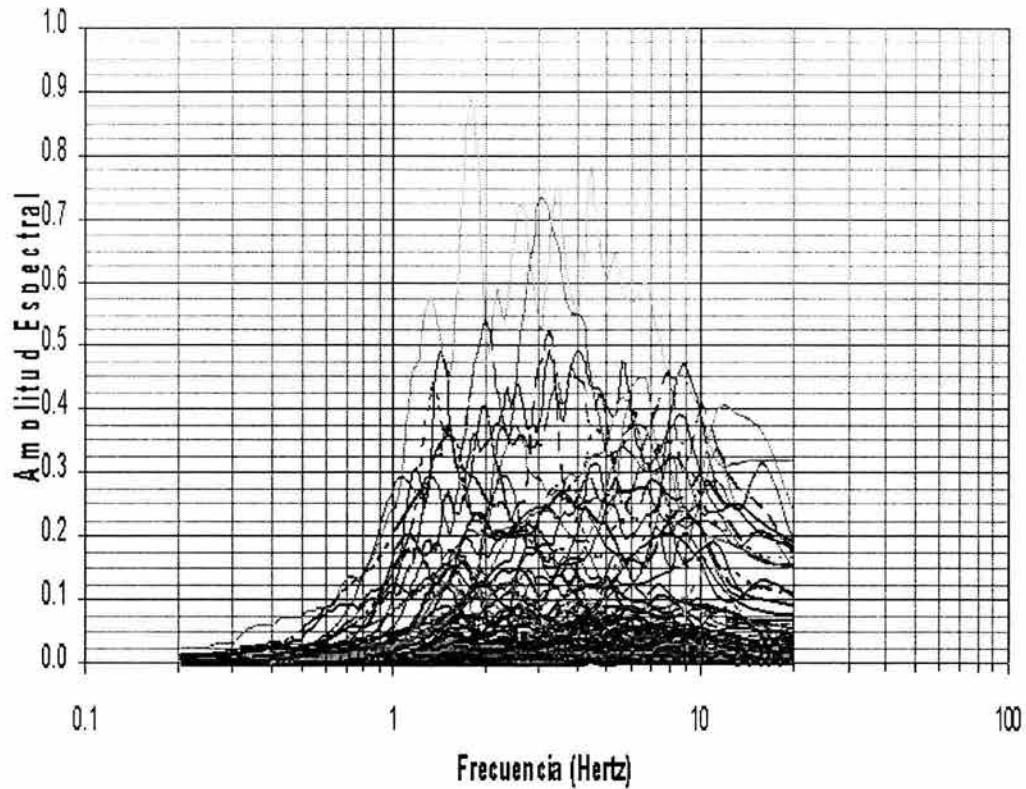


Figura 2.15 - Espectro de respuesta en la corona (Acelerógrafo C).

Mediante la interpretación de la figura 2.15 se concluye que los sismos captados en la corona de la cortina integraron un comportamiento común para una frecuencia próxima a 1.8 Hz, la cual está vinculada al valor de amplitud espectral máximo (0.90) provocado por el sismo 29. Referente a la energía relacionada a este espectro, de la imagen se observó que dicha energía se concentró entre las frecuencias de 0.6 y 20.0 Hz y se confino por un valor de amplitud espectral promedio de 0.12. Se observó que la ocurrencia de algunos sismos como el antes citado, provocaron en la zona analizada, excitaciones para frecuencias diferentes a la característica con valores próximos a los 2.6, 3.5 y 4.5 Hz, manifestando altos valores de amplitud espectral.

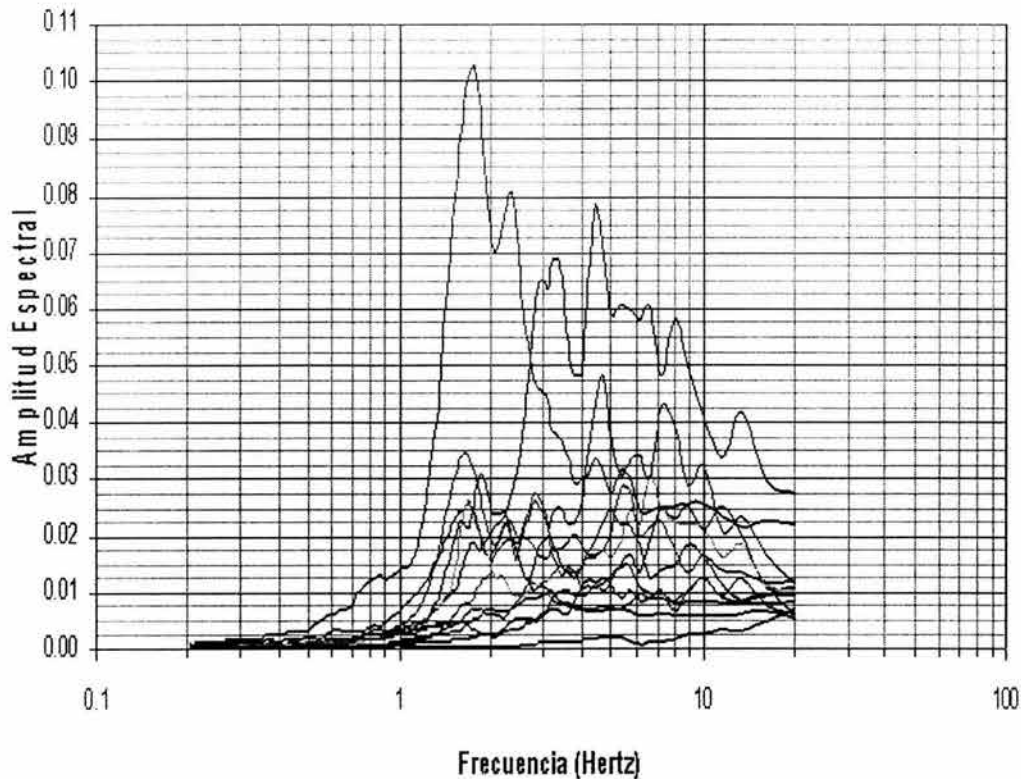


Figura 2.16 - Espectro de respuesta aguas abajo en la corona (Acelerógrafo G).

La figura 2.16 presenta el comportamiento de los sismos percibidos por el acelerógrafo G, cuya zona de influencia está próxima a la margen derecha de la estructura en su nivel superior. Dicho comportamiento adopta familiaridad para una frecuencia cercana a 1.7 Hz, misma con la que se generó el mayor valor de amplitud espectral del registro e igual a 0.10 como consecuencia del evento sísmico 98. La energía adjunta a este espectro se resume a aquella concentrada entre 0.90 y un valor superior a los 20.0 Hz, y limitada por una amplitud espectral promedio de 0.025. También se observaron frecuencias diferentes a la característica que provocaron excitaciones en la zona de estudio como consecuencia tanto del suceso sísmico ya comentado como del número 89, dichas frecuencias están próximas a 2.4, 3.2, 4.5 y 8.0 Hz y generaron valores de amplitud espectral elevados.

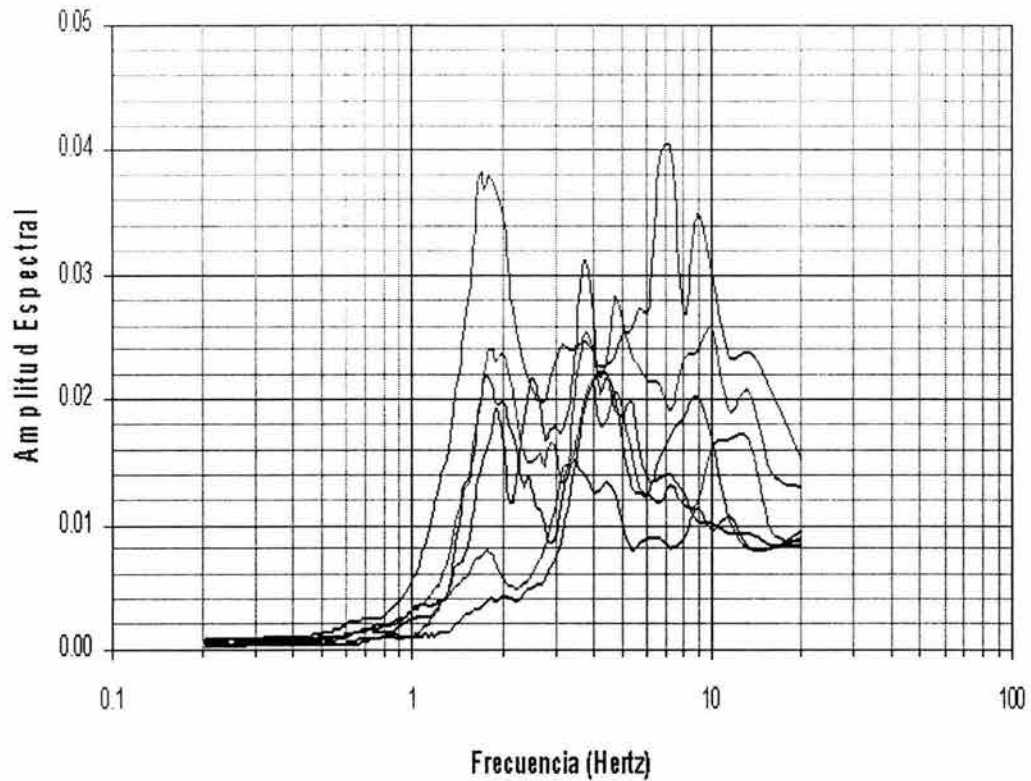


Figura 2.17 - Espectro de respuesta aguas arriba en la corona (acelerógrafo H).

De esta figura se observa que los sismos captados siguieron un comportamiento común cerca de la frecuencia de 1.7 Hz. En particular, se obtuvo como respuesta del sismo 110 un valor de amplitud espectral de 0.038, no siendo este el máximo ya que para una frecuencia de 7.1 Hz la amplitud fue igual a 0.04, también como consecuencia de este evento. En cuanto a la cantidad de energía relacionada con este espectro, se observa que ésta se concentró entre 0.7 y un valor mayor a los 20.0 Hz, quedando limitada por un valor promedio de amplitud espectral igual a 0.022. La figura también expone que algunos fenómenos sísmicos como el ya citado, ocasionaron en la zona analizada, excitaciones en la estructura para frecuencias diferentes a la característica, ya que en valores de 3.8, 7.2, y 8.9 Hz aproximadamente se generaron valores de amplitud elevados.

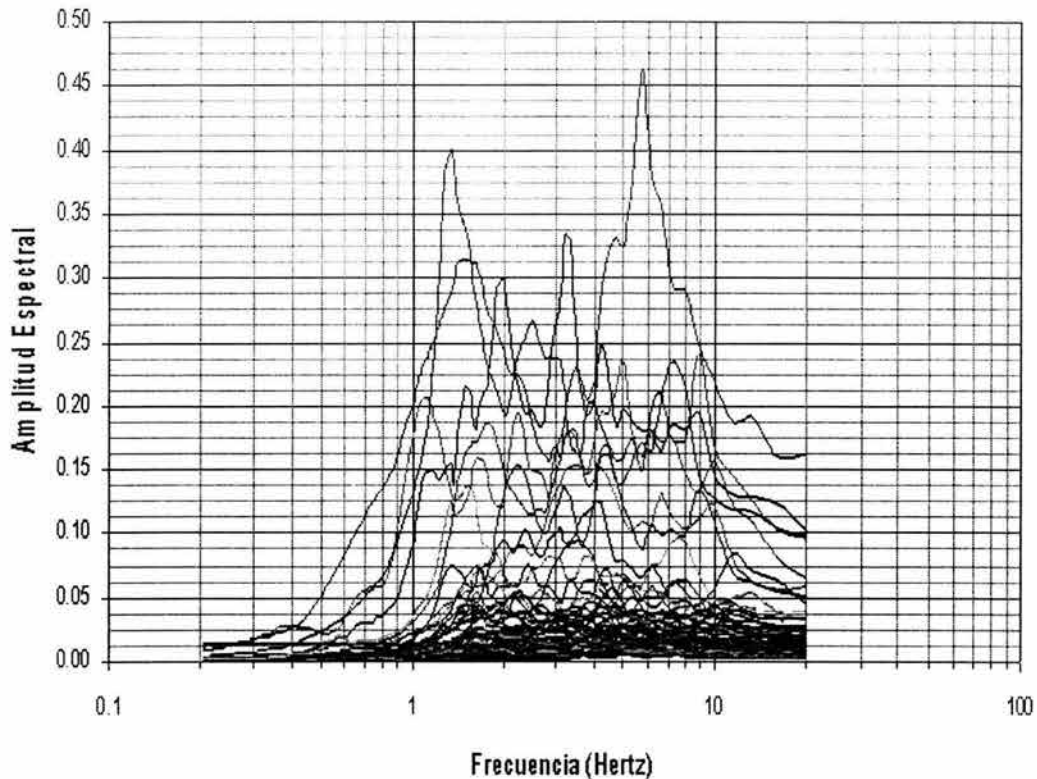


Figura 2.18 - Espectro de respuesta en la corona testigo (Acelerógrafo T).

El acelerógrafo T se instaló con la finalidad de comparar los registros realizados por el acelerógrafo C y evaluar de manera más confiable el comportamiento en la corona de la cortina. Su registro muestra que los eventos sísmicos adoptaron un comportamiento común para una frecuencia próxima a 1.3 Hz, misma que esta ligada a un valor de amplitud espectral de 0.40 como consecuencia del sismo 182, aunque nuevamente se observa el desarrolló un valor de amplitud espectral mayor (0.46) vinculado a una frecuencia de 5.7 Hz, aproximadamente, y al sismo 192. En relación a la energía asociada a este espectro, se observó que ésta equivale al área de la grafica limitada por las frecuencias mínima y máxima de 0.7 y 20.0 Hz respectivamente y un valor promedio de amplitud espectral de 0.075. La figura también indica que la zona en estudio sufrió otras excitaciones como respuesta a varios de los eventos sísmicos registrados, ya que para frecuencias de 3.2 y 5.7 Hz aproximadamente, se desarrollaron altos valores de amplitud.

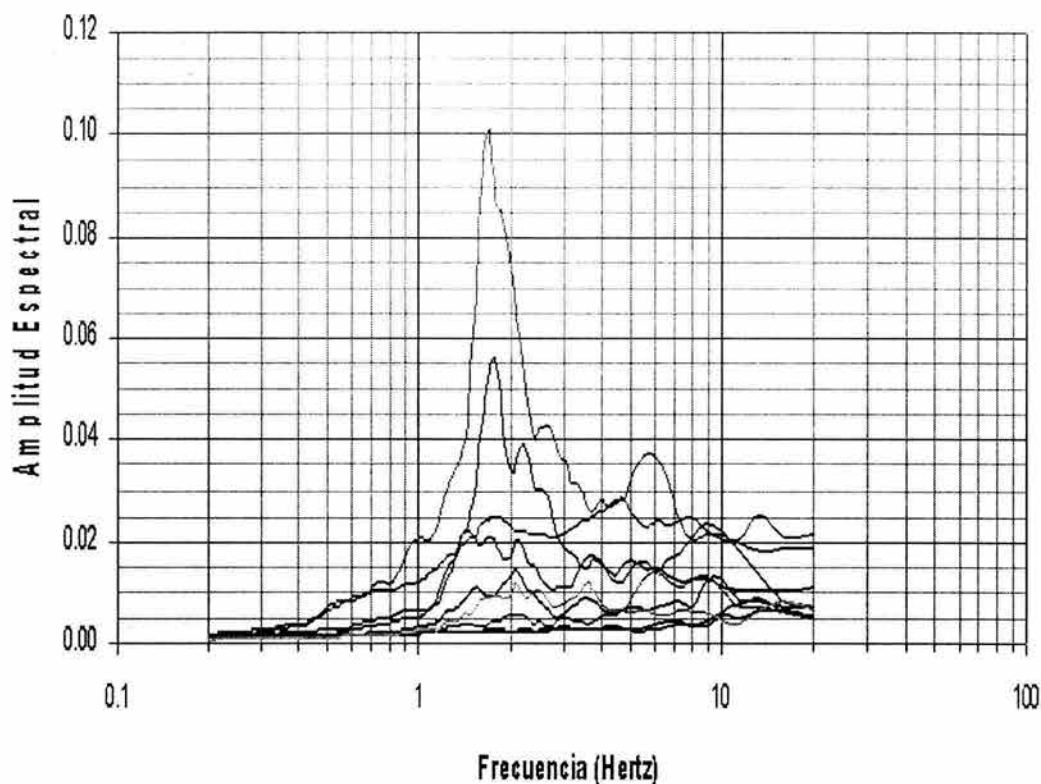


Figura 2.19 - Espectro de respuesta en el cuerpo de la cortina, elevación 35 (Acelerógrafo 1).

De la figura presentada para el espectro de respuesta elaborado por el acelerógrafo 1, instalado dentro de un inclinómetro en el núcleo impermeable de la cortina, se concluye que en esta región los sismos registrados desarrollaron un comportamiento común para una frecuencia próxima a 1.7 Hz, la cual corresponde al valor de amplitud espectral máximo (0.10) causado por el evento sísmico 98. Respecto a la energía asociada a este espectro, se observa que esta equivale al área de la imagen confinada por un valor de amplitud espectral promedio de 0.02 y un intervalo de frecuencias con valor mínimo de 0.8 y máximo de 20.0 Hz. En este caso no hubo excitaciones en la zona de estudio provocadas por frecuencias diferentes a la característica.

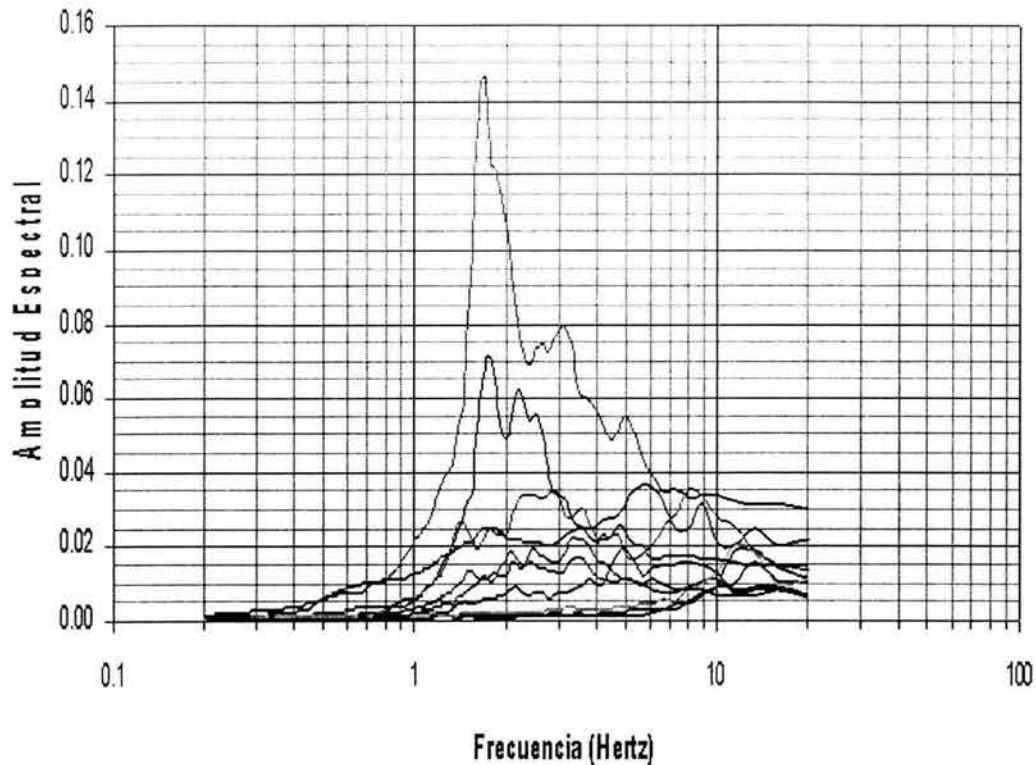


Figura 2.20 - Espectro de respuesta en el cuerpo de la cortina, elevación 49,5 (Acelerógrafo 2).

Esta figura describe el comportamiento de los sismos captados por el acelerógrafo 2. Al analizarla se concluye que los sismos integraron un comportamiento común para una frecuencia próxima a 1.7 Hz y en la cual se presentó el valor de amplitud espectral máximo (0.15), como consecuencia del sismo 101. Referente a la energía relacionada con este espectro, de la imagen se observó que ésta se concentró entre 0.9 y 20.0 Hz y se limitó por un valor de amplitud espectral promedio de 0.03. Análogamente a la interpretación de la figura 2.19, que coincide con la zona de análisis de este acelerógrafo, tampoco hubo excitaciones provocadas por frecuencias diferentes a la característica.

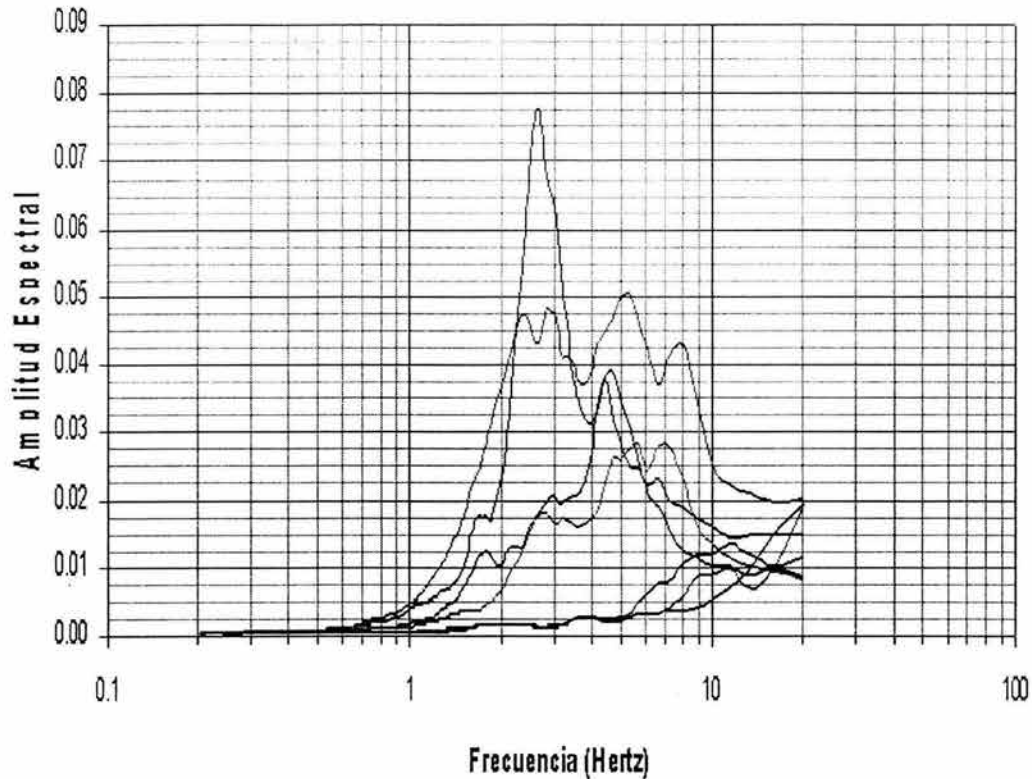


Figura 2.21 - Espectro de respuesta en el cuerpo de la cortina (Acelerógrafo 6).

La figura 2.21 describe el comportamiento de los sismos percibidos por el acelerógrafo 6, instalado en un inclinómetro cercano a la margen derecha de la estructura en la elevación 30. Se observa que la mayoría de los eventos adquirieron un comportamiento común para una frecuencia cercana a 2.7 Hz, en la que se presentó el valor máximo de amplitud espectral (0.075) debido a la ocurrencia del evento sísmico número 123. La energía adjunta a este espectro se resume a aquella concentrada entre las frecuencias de 0.80 y 20.0 Hz y limitada por un valor de amplitud espectral promedio de 0.03. De acuerdo a la figura, esta región de la cortina sufrió una excitación que se distingue por el valor de amplitud espectral elevado para una frecuencia de 5.2 Hz aproximadamente.

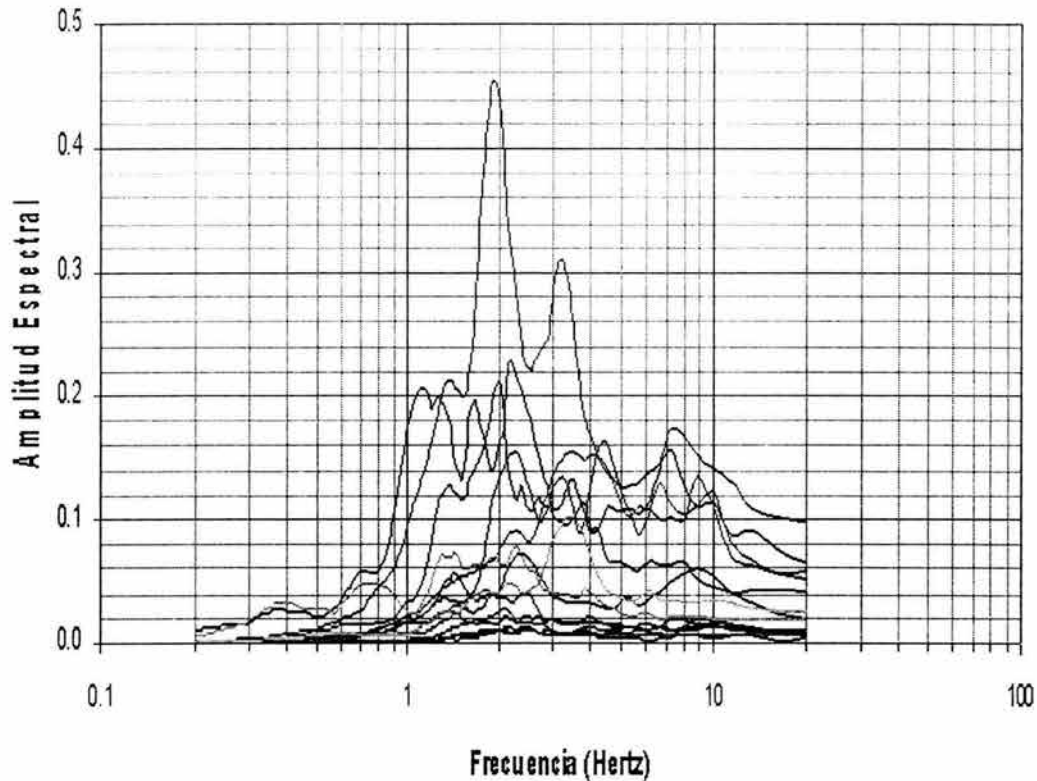


Figura 2.22 - Espectro de respuesta en el cuerpo de la cortina (Acelerógrafo P).

Esta figura describe el comportamiento de los sismos registrados por el acelerógrafo P. De la imagen se traduce que los fenómenos sísmicos en este caso siguieron un comportamiento familiar para una frecuencia cercana a 1.9 Hz, valor vinculado al de amplitud espectral máxima del registro e igual a 0.45 que fue provocado por el sismo 153. En cuanto a la cantidad de energía relacionada a este espectro, se observa que ésta quedó confinada por un valor mínimo de 0.7 Hz aproximadamente, uno máximo de 20 y un valor promedio de amplitud espectral igual a 0.16. La figura también expone que algunos de los fenómenos sísmicos captados provocaron en la zona analizada excitaciones para una frecuencia de 3.2 Hz aproximadamente, manifestándolo con un valor alto de amplitud espectral.

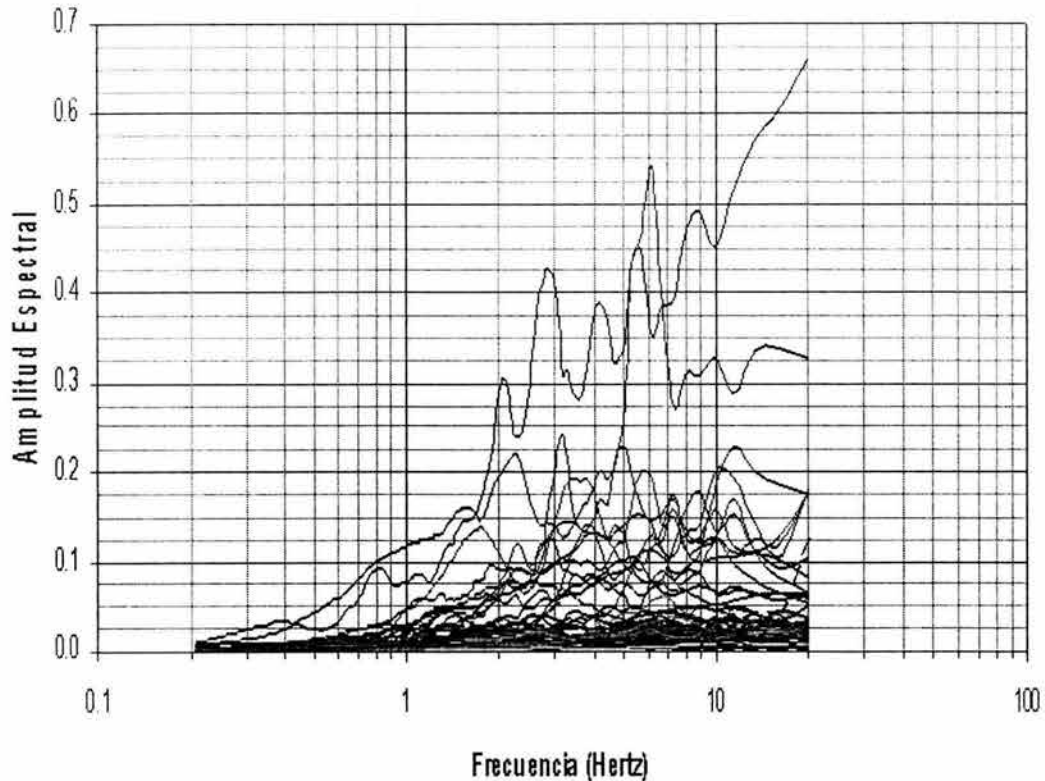


Figura 2.23 - Espectro de respuesta en la margen derecha (Acelerógrafo D).

La figura presentada expone para la margen derecha de la estructura, el comportamiento de los sismos que fueron registrados en la estación sismológica donde se encuentra instalado el acelerógrafo D. Su análisis indica que los eventos sísmicos establecieron un comportamiento afín para una frecuencia cercana a 6.1 Hz, misma que esta vinculada a un valor de amplitud espectral igual a 0.55, generado por el sismo 192; sin embargo, esta amplitud no es la máxima pues se observa que para una frecuencia de 20.0 Hz y como respuesta al sismo 158 se dio el valor máximo de amplitud espectral igual a 0.66. Respecto a la energía asociada a este espectro, se observa que esta equivale al área de la imagen limitada por un valor de amplitud espectral promedio de 0.15 y un intervalo de frecuencias con valor mínimo de 0.8 y máximo de 20.0 Hz. Otro aspecto importante que revela la figura es que varios fenómenos sísmicos produjeron excitaciones en esta región de la estructura para frecuencias diferentes a la característica, alcanzando valores de amplitud espectral altos, dichas frecuencias se aproximan a los 2.8, 4.2, 8.9 y 20.0 Hz.

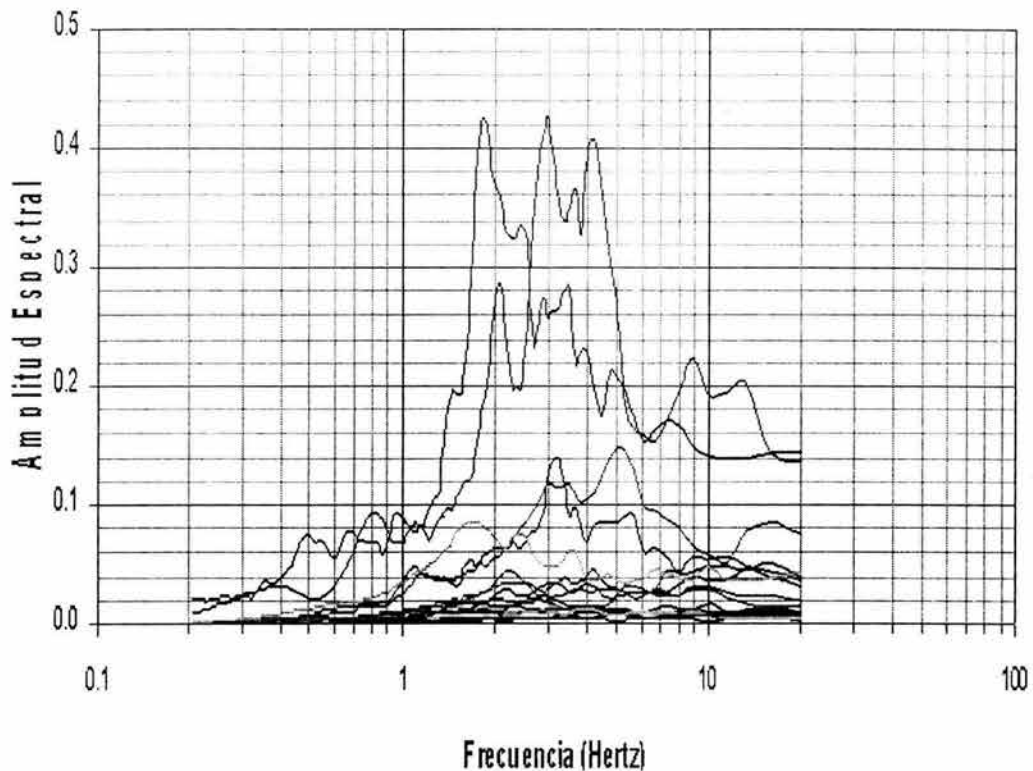


Figura 2.24 - Espectro de respuesta en la margen derecha (Acelerógrafo E).

La figura 2.24 describe el comportamiento de los sismos registrados por el acelerógrafo E, situado en la margen derecha de la cortina. Aunque exhibe una cantidad pequeña de sismos permite establecer que dichos eventos adquirieron características similares para una frecuencia próxima a 3.1 Hz, en la cual se obtuvo como respuesta al sismo 158 el valor de amplitud espectral máximo igual a 0.43. En cuanto a la energía relacionada con este espectro, se observa que ésta se concentró entre 0.8 y 20.0 Hz y se limitó por un valor promedio de amplitud igual a 0.08. La figura también expone que algunos fenómenos sísmicos como los ya mencionados, ocasionaron en la zona analizada, excitaciones de la estructura para otras frecuencias diferentes a la característica, ya que para valores de 1.9 y 4.2 Hz aproximadamente se presentaron valores de amplitud espectral altos.

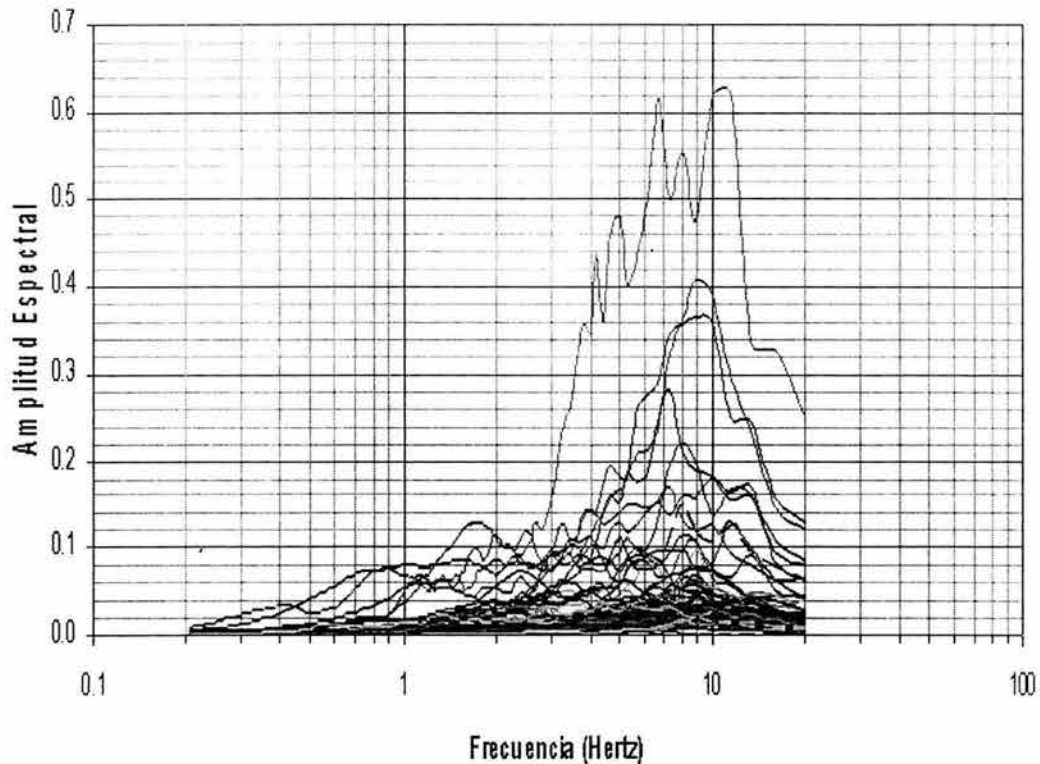


Figura 2.25 - Espectro de respuesta en la margen izquierda (Acelerógrafo I).

Finalmente, esta figura expone el comportamiento de los sismos registrados por el acelerógrafo I, cuya estación de registro se encuentra localizada en la margen izquierda de la cortina. Su interpretación deja claro que los fenómenos sísmicos siguieron un comportamiento análogo para una frecuencia cercana a 8.0 Hz, la cual corresponde a una amplitud espectral de 0.55 causada por el sismo 158, no obstante el valor máximo de amplitud de este registro se produjo para una frecuencia cercana a 11.2 Hz, alcanzando un valor de 0.62 como consecuencia del mismo sismo. En cuanto a la cantidad de energía relacionada con este espectro, se observa que ésta equivale al área de la figura delimitada por un valor mínimo de 1.2 Hz, uno máximo de 20.0 y un valor promedio de amplitud igual a 0.16. También se observa que algunos de los fenómenos sísmicos captados provocaron en la zona analizada excitaciones para frecuencias próximas a 5.0, 6.7 y 11.2 Hz, manifestándolo con valores de amplitud espectral altos.

Por medio de las figuras 2.13 a 2.25 pudo establecerse que de manera general los espectros de respuesta de los sismos registrados por la instrumentación dinámica de la presa José María Morelos manifestaron concentraciones de energía comprendidas entre 0.7 y 20.0 Hz, sólo los acelerógrafos G y H instalados en la corona de la presa muestran concentraciones de energía para valores mayores a los 20.0 Hz. Además se observó que la frecuencia característica tanto para la base como para la corona se aproximó a 1.7 Hz, mientras que en las márgenes se alcanzaron valores de hasta 6.1 Hz (Derecha) y 8.0 Hz (Izquierda).



3 – MÉTODOS DE ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los métodos de análisis utilizados para revisar el comportamiento dinámico de la presa José María Morelos, estos se basan en 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.

3.1 – 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 los componentes armónicos será la función periódica.

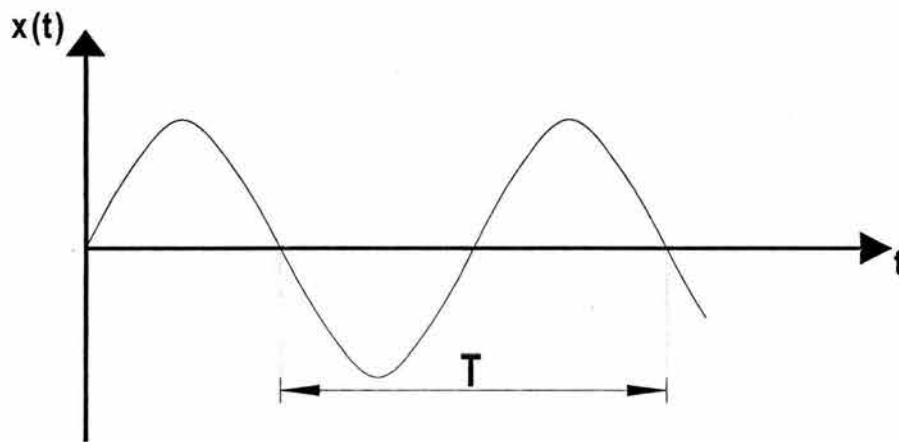


Figura 3.1 – Función periódica arbitraria del tiempo

Si $\xi(t)$ es una función periódica del tiempo t , con periodo T , tal como se muestra en la figura 3.1, siempre es posible expresar $\xi(t)$ como una serie infinita de términos trigonométricos de la forma:

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

o, en notación más compacta,

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi k t}{T} + b_k \operatorname{sen} \frac{2\pi k t}{T} \right) \dots \dots (3.1)$$

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



$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos \frac{2\pi k t}{T} dt \dots\dots (3.2)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \text{sen} \frac{2\pi k t}{T} dt$$

Las condiciones matemáticas dadas para la convergencia de la ecuación (3.1) 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 3.1 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 3.2.

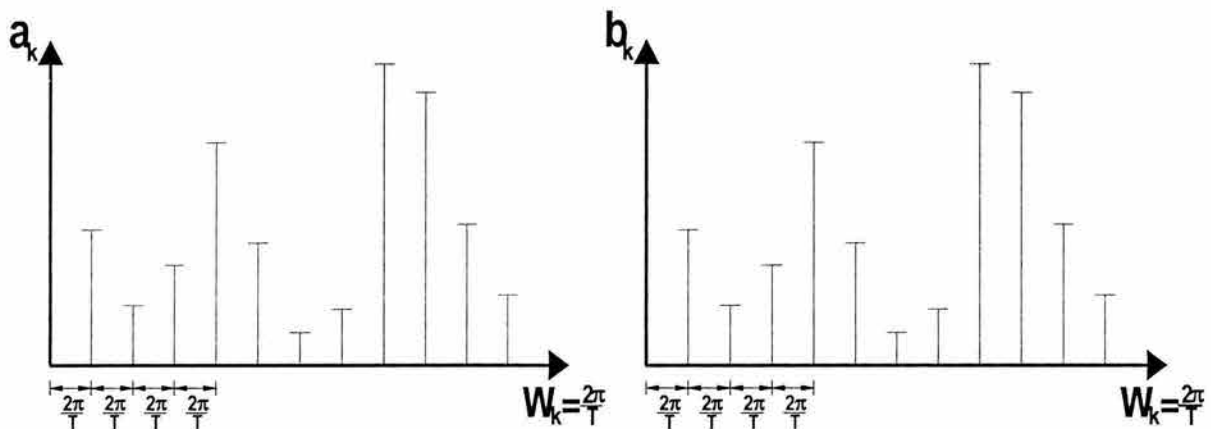


Figura 3.2 – Representación gráfica de los coeficientes de Fourier

El eje horizontal de la figura 3.2 se ha elegido para representar la frecuencia y la situación del k-ésimo coeficiente es:

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{T} \dots\dots (3.3)$$

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

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \dots\dots (3.4)$$



Veremos que cuanto mayor es el periodo T , más pequeño es el espacio $\Delta\omega$, y los coeficientes de Fourier están más estrechamente espaciados en la figura 3.2. 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 podemos servirnos de la misma idea, si bien la serie de Fourier (ecuación 3.1) se convertirá en una integral de Fourier y los coeficientes de Fourier (ecuación 3.2) se convertirán en funciones continuas de la frecuencia, denominadas “**Transformadas de Fourier**”.

Integral de Fourier

Sustituyendo la ecuación (3.2) en la ecuación (3.1) se obtiene para $a_0=0$,

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

A continuación sustituyendo el valor de $\frac{2\pi k}{T}$ obtenido de la ecuación (3.3) y el de $f = \frac{1}{T}$ obtenido en la ecuación (3.4), tenemos:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} x(t) \cos \omega_k t dt \right) \cos \omega_k t + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} x(t) \operatorname{sen} \omega_k t dt \right) \operatorname{sen} \omega_k t$$

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

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

o poniendo,

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

..... (3.5)

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

Los términos $A(\omega)$ y $B(\omega)$ definidos por la ecuación (3.5) 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:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \dots\dots (3.6)$$

Que debe cumplirse para que la ecuación (3.5) sea cierta. La teoría clásica es válida solamente para funciones que tienden a cero cuando $|t| \rightarrow \infty$, de modo que se satisfaga la ecuación (3.6).

3.2 - CORRELACIONES

Este método se basa en la teoría de vibraciones aleatorias y resulta bastante confiable ya que hace uso de los acelerogramas registrados en el cuerpo de la presa.

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 arriba 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 $\tau = t_2 - t_1$, en cuyo caso se puede obtener mediante la ecuación (3.7).

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \dots\dots (3.7)$$

De la función de autocorrelación se obtiene un valor real para cualquier τ de defasamiento 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.

$$R_y(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)y(t+\tau) dt \dots\dots (3.8)$$

De igual manera la ecuación (3.7) 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:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \dots\dots (3.9)$$

De la función de autocorrelación se obtiene un valor real para cualquier t de defasamiento entre los procesos y presenta un máximo para un desplazamiento en el tiempo t , 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 3.3). 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 (aire). 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 en ambos micrófonos para los siguientes casos: a) sin superficies que refracten la señal, b) con la superficie refractante lateral, c) con la superficie refractante en la parte posterior del micrófono dos y d) con ambas superficies refractantes.

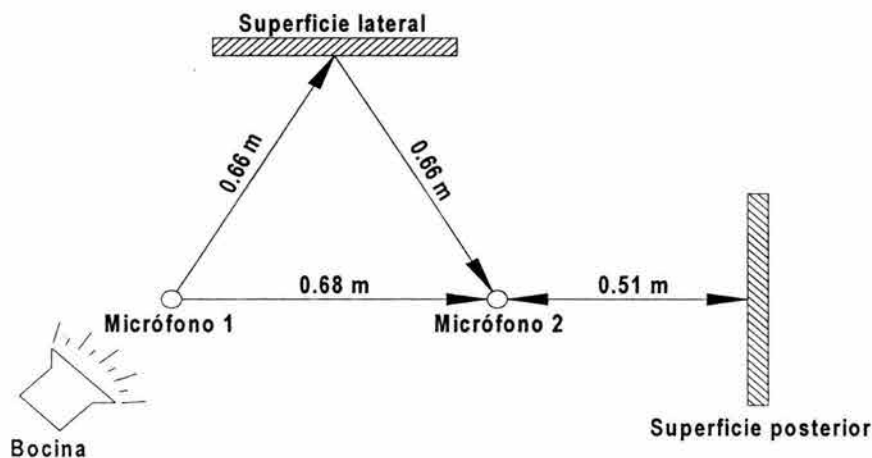


Figura 3.3 – Experimento acústico

Las correlaciones cruzadas entre los dos micrófonos, calculadas para las cuatro variantes del experimento acústico, están dibujadas en la figura 3.4. 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 $2 \mu\text{s}$, este está representado por la posición del pico en la función de correlación cruzada (figura 3.4 a). Si existe una superficie reflejante, lateral y equidistante a los dos micrófonos, la señal tarda $3.9 \mu\text{s}$ en recorrer 1.32 m (figura 3.4 c). 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 $5 \mu\text{s}$ (figura 3.4 b).

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 3.4 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.

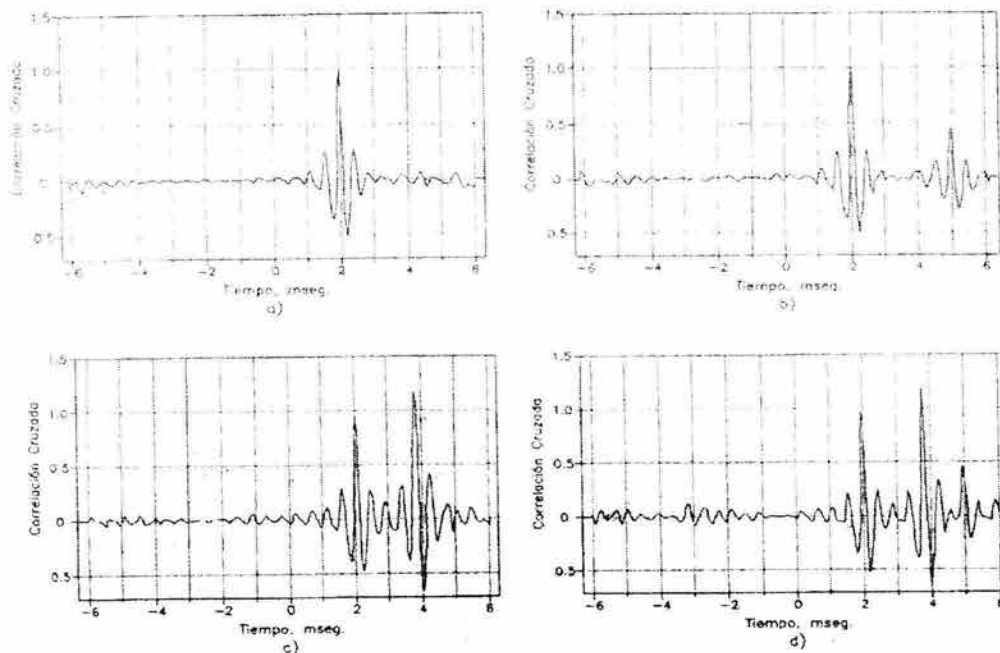


Figura 3.4 – Correlaciones cruzadas del experimento acústico

Al aplicar la transformada de Fourier a las funciones de autocorrelación de entrada $R_X(\tau)$ y salida $R_Y(\tau)$ se obtiene como resultado la función de densidad espectral. Esta función describe la composición frecuencial del proceso aleatorio y se evalúa mediante la expresión:

$$G_X(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_X(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = 4 \int_0^{\infty} R_X(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau \dots \dots (3.10)$$

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:

$$G_{XY}(f) = C_{XY}(f) - jQ_{XY}(f) \dots \dots (3.11)$$

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, el tiempo de retardo 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:

$$H(f) = \frac{G_{XY}(f)}{G_X(f)} \dots \dots (3.12)$$

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

$$G_{XY}(f) = |G_{XY}(f)| e^{-j\theta_{XY}(f)} \dots\dots (3.13)$$

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:

$$|G_{XY}(f)| = \sqrt{C_{XY}^2(f) + Q_{XY}^2(f)} \dots\dots (3.14)$$
$$\theta_{XY}(f) = \tan^{-1} \left[\frac{Q_{XY}(f)}{C_{XY}(f)} \right]$$

donde la función $\theta_{XY}(f)$ es llamada ángulo de fase. Como ejemplo del significado físico del ángulo de fase, en la figura 3.5 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.

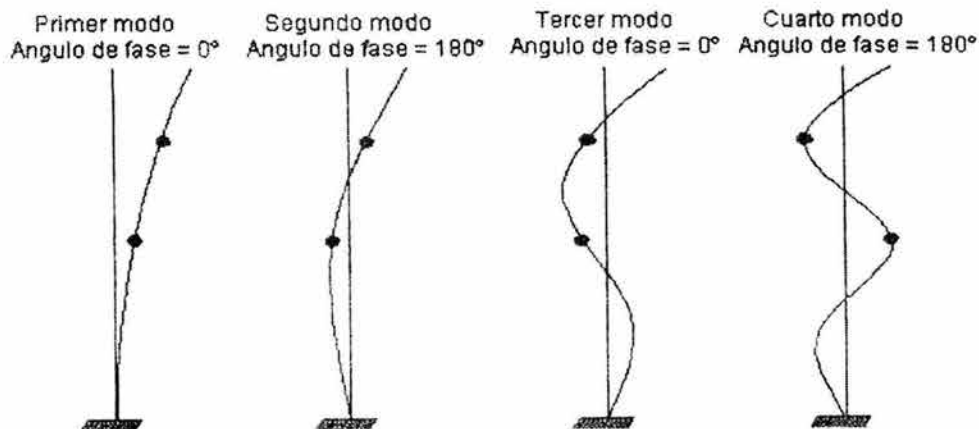


Figura 3.5 – Primeros cuatro modos de vibrar de una estructura en cantiliver.

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

$$\gamma_{XY}^2(f) = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_X(f)G_Y(f)} \dots\dots (3.15)$$

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 a 0.



Capítulo III – Métodos de análisis

En la figura 3.6 se presentan las gráficas del ángulo de fase y función de coherencia del experimento acústico (figura 3.3). En la figura 3.6a 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 1 en las funciones de coherencia cuando la señal tiene una única ruta de propagación. En la figura 3.6b se muestran las curvas de ángulos de fase y función de coherencia cuando existen diferentes rutas de propagación.

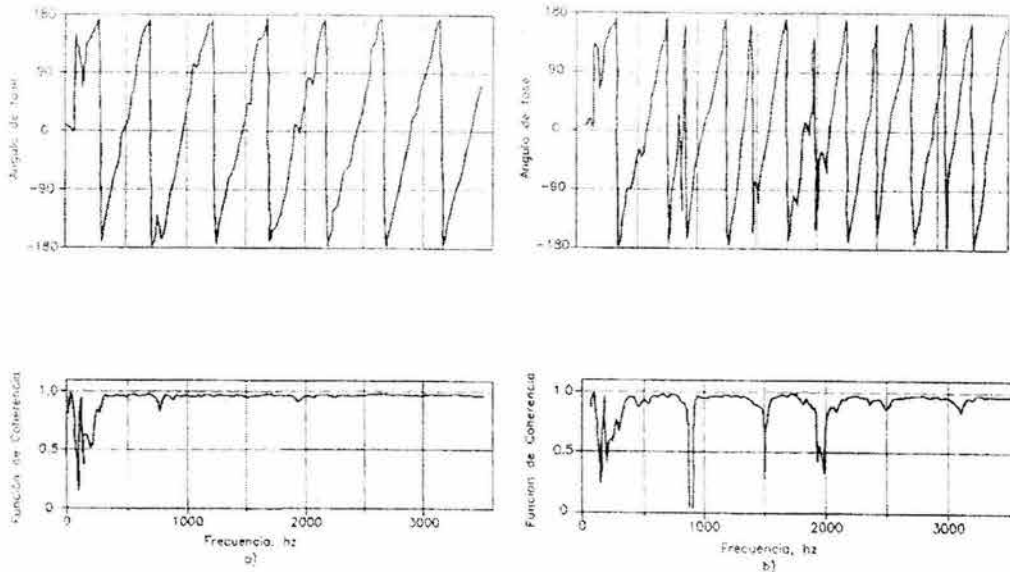


Figura 3.6 – Ángulo de fase y función de coherencia del experimento acústico.

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 registrados 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 3.7

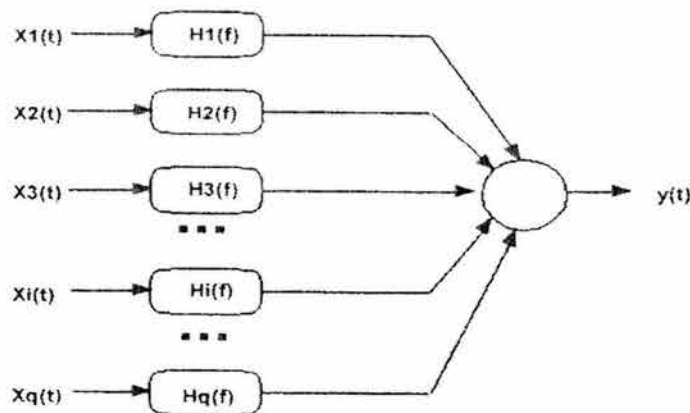


Figura 3.7 – Proceso aleatorio de q arribos y una sola respuesta.



En la mayoría de las 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:

$$H_1(f) = \frac{G_{1Y}(f) \left[1 - \frac{G_{12}(f)GS_{2Y}(f)}{G_{22}(f)G_{1Y}(f)} \right]}{G_{11}(f) [1 - \gamma_{12}^2(f)]} \dots\dots (3.16)$$

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

Donde las funciones de densidad espectral, G_{1Y} , G_{2Y} , G_{11} , G_{22} , G_{12} y G_{21} son evaluadas con las ecuaciones (3.10) y (3.11), y la función de coherencia γ_{12}^2 con la ecuación (3.15).



4 – ANÁLISIS DINÁMICO

El análisis del comportamiento dinámico de presas sometidas a fenómenos sísmicos, se refiere al cálculo de las deformaciones permanentes o a los daños que puedan inutilizar la presa, como son el agrietamiento del núcleo impermeable o la pérdida de bordo libre. Uno de los propósitos de este análisis es obtener las características de vibración que permitan llegar a estimar los sismos que de manera importante puedan afectar la estructura, así mismo, generar recomendaciones en el diseño de las estructuras térreas.

El análisis de la presa José María Morelos se desarrollará a partir de la información sísmica recabada en el periodo de enero de 1972 a enero del 2003 y será a través de las gráficas realizadas por medio del Método de Vibraciones aleatorias, con el cual se obtuvieron los espectros de respuesta, las funciones de transferencia, las funciones de coherencia, los ángulos de fase y los tiempos de retardo.

Como se verá en cada una de las cuatro variables a analizar, la mayoría de los sismos registrados mediante los instrumentos de medición instalados en la cortina, adquirieron características de comportamiento comunes durante su ocurrencia, por lo que el objetivo fundamental de este capítulo es identificar a través de estos registros sísmicos todos aquellos eventos que manifestaron un comportamiento diferente, pues son estos los que pudieron haber generado las mayores perturbaciones de la estructura.

4.1 – FUNCIONES 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 la 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:

$$x(t) = I \delta(t) \dots \dots (4.1)$$

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

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) dt = I, \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = I \text{ en } (Fuerza) \times (Tiempo) \dots \dots (4.2)$$

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 I tiene las dimensiones correctas. La excitación es una unidad de impulso cuando I 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 4.1). Nótese que cuando $h(t) = 0$ para $t < 0$ entonces $y(t) = 0$, es decir antes de que ocurra la vibración o el impulso.

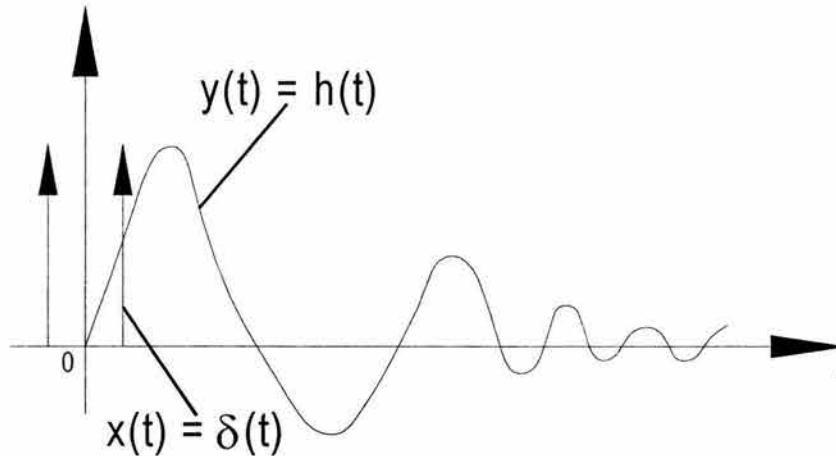


Figura 4.1 – Función de transferencia

Los registros de la función de transferencia obtenidos a partir de los distintos acelerógrafos instalados en el cuerpo de la cortina de la presa José María Morelos, están representados de la figura 4.2 a la 4.30.

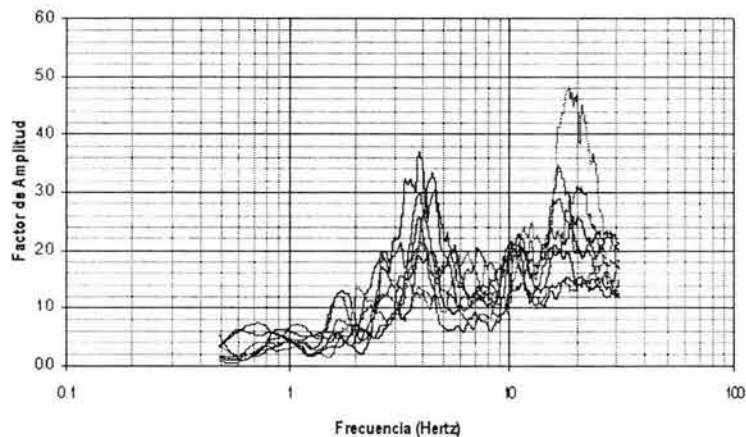


Figura 4.2 - Función de transferencia del deck 1 a la corona centro.

Esta figura corresponde al registro sísmico de función de transferencia de los sismos captados de la elevación 35 a la corona de la cortina (acelerógrafos 1 y C). Se observa que los sismos asumieron para un intervalo de frecuencias de 1.3 a 2.2 Hz un comportamiento similar teniendo como frecuencia característica una próxima a 1.7 Hz. Este registro no presenta sismo alguno que haya desarrollado un comportamiento con características diferentes a las descritas, solo cabe mencionar que la amplificación máxima se manifestó para una frecuencia de 19.0 Hz aproximadamente.



Capítulo IV – Análisis dinámico

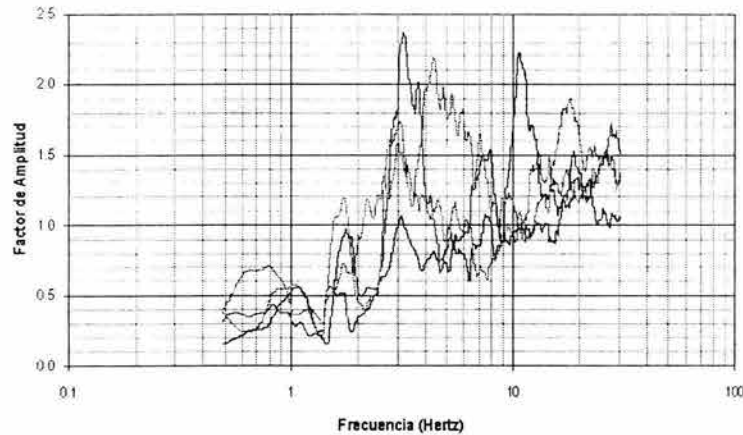


Figura 4.3 - Función de transferencia del deck 1 hacia aguas abajo en la corona.

La figura 4.3, describe el registro sísmico entre los acelerógrafos 1 y G, en ella se observan sólo cuatro sismos, de los cuales tres manifestaron para un intervalo de frecuencias comprendido entre 1.3 y 2.4 Hz un comportamiento común, con un valor característico de 1.7 Hz aproximadamente, de tal forma que sólo el sismo 110, ya descrito en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, queda excluido de esta generalidad por haber presentado un ligero defasamiento respecto a la frecuencia característica. En esta ocasión la amplitud máxima se dio para 3.1 Hz aproximadamente.

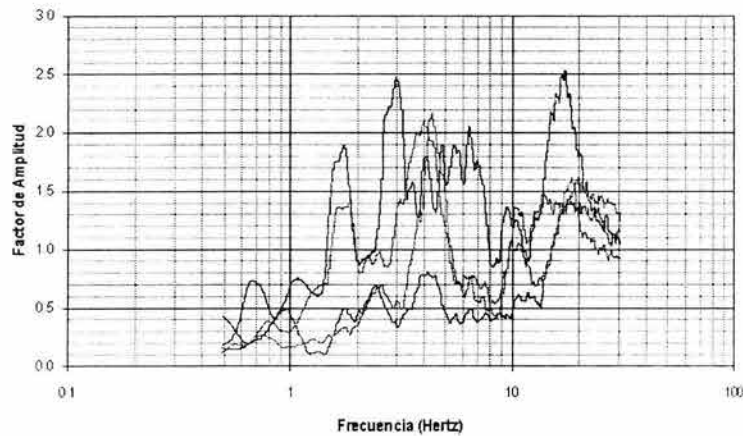


Figura 4.4 - Función de transferencia del deck 1 hacia aguas arriba en la corona.

El registro sísmico de función de transferencia elaborado por los instrumentos de medición 1 y H e ilustrado a través de la figura 4.4, expone que tres sismos adquirieron para un intervalo de frecuencias de 1.3 a 2.2 Hz, un comportamiento afín y cuya frecuencia característica se aproximó al valor de 1.7 Hz. Sólo el sismo 110 presentó características diferentes a las comentadas. Se observa que la amplitud máxima se desarrolló para una frecuencia de 3.0 Hz aproximadamente.

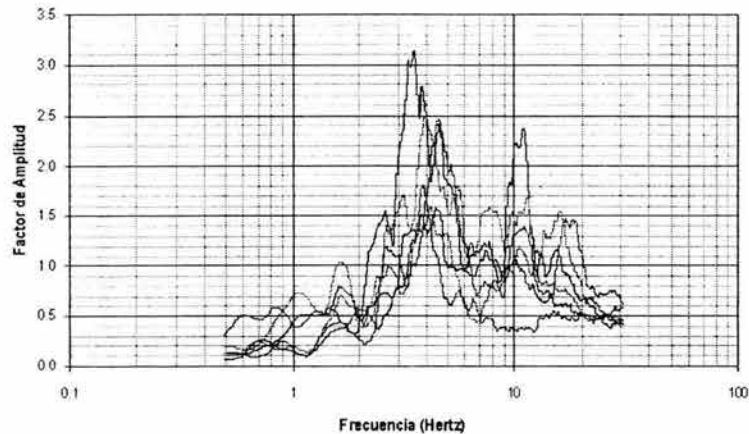


Figura 4.5 - Función de transferencia del deck 1 a la corona testigo.

El registro sísmico presentado en la figura 4.5 muestra los sismos captados entre los acelerógrafos 1 y T, instalados en la elevación 35 y en la corona de la cortina respectivamente. Dichos eventos asumieron en general un comportamiento análogo para un intervalo de frecuencias comprendido entre 1.3 y 2.2 Hz, observándose para ellos una frecuencia característica próxima a 1.7 Hz. En este caso sólo el sismo 98 presentó diferencias respecto a este comportamiento. La amplitud máxima de este registro se presentó para una frecuencia aproximada de 3.4 Hz.

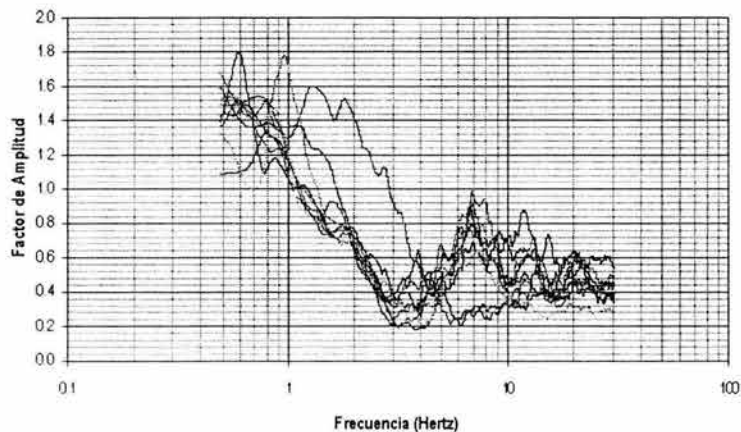


Figura 4.6 - Función de transferencia del deck 2 al deck 1.

Este registro sísmico de función de transferencia es el resultado del monitoreo realizado por los acelerógrafos 2 y 1, instalados ambos en un inclinómetro dentro del núcleo impermeable de la cortina en las elevaciones 35 y 49.5 respectivamente. De él se concluye que en general los fenómenos sísmicos desarrollaron un comportamiento común para un intervalo de frecuencias comprendido entre 0.7 y 1.5 Hz, con una frecuencia característica próxima a 0.9 Hz, misma para la que se desarrolló la mayor amplificación. Sólo los sismos 109 y 112 no manifestaron estas características por lo que se excluyen de dicho comportamiento.

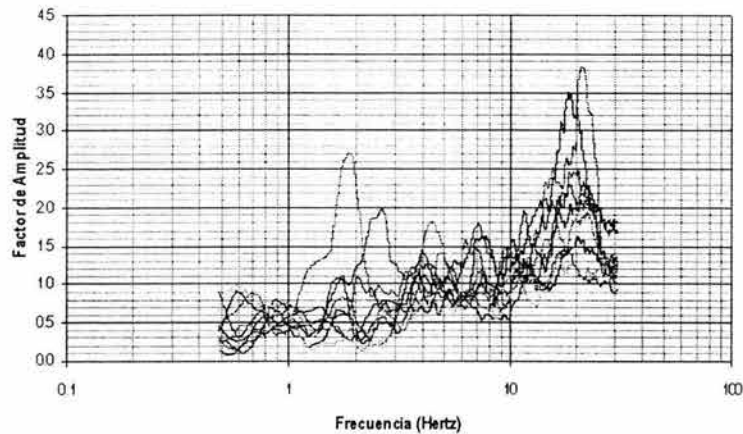


Figura 4.7 - Función de transferencia del deck 2 a la corona centro.

Esta imagen permite definir el comportamiento de los eventos sísmicos registrados de la elevación 49.5 a la corona de la cortina mediante los equipos de medición 2 y C. Dicho comportamiento en general fue común y se manifestó para un intervalo de frecuencias comprendido entre 1.3 y 2.2 Hz, teniendo como frecuencia característica una próxima a 1.7 Hz. En esta ocasión los sismos 101, 109 y 112 presentaron características diferentes a las antedichas, por lo cual se excluyen del comportamiento citado. Destaca en la figura que la máxima amplitud se obtuvo para una frecuencia de 21.0 Hz aproximadamente.

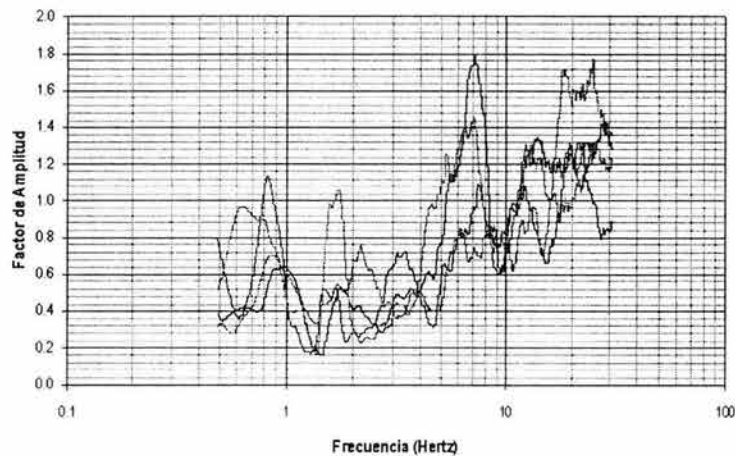


Figura 4.8 - Función de transferencia del deck 2 hacia aguas abajo en la corona.

Para el registro sísmico de función de transferencia presentado en la figura 4.8, donde se exhiben los sismos captados de la elevación 49.5 a la corona de la cortina mediante los instrumentos de monitoreo 2 y G, se establece que el comportamiento de la mayoría de los eventos fue común para un intervalo de frecuencias comprendido entre 1.3 y 2.2 Hz, cuya frecuencia característica se acercó a 1.7 Hz y sólo el sismo 98 manifestó un comportamiento diferente al descrito anteriormente. En esta ocasión la amplificación máxima se manifestó para 7.0 Hz aproximadamente.



Capítulo IV – Análisis dinámico

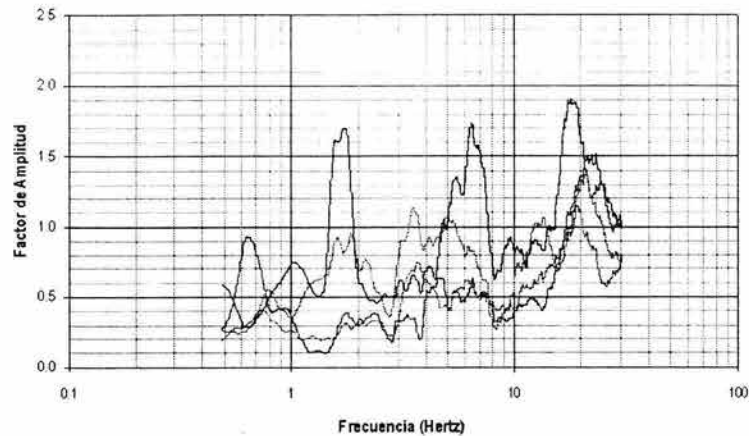


Figura 4.9 - Función de transferencia del deck 2 hacia aguas arriba en la corona.

La figura 4.9 corresponde al registro sísmico de función de transferencia de los eventos registrados de la elevación 49.5 a la corona de la cortina por medio de los instrumentos de medición 2 y H. Se observa de manera general que los sismos siguieron un comportamiento análogo para un intervalo de frecuencias comprendido entre 1.3 y 2.1 Hz, con una frecuencia característica próxima a 1.8 Hz. En este caso sólo el sismo 110 presentó, durante su desarrollo, características diferentes a las mencionadas. Se observa que la amplitud máxima se desarrolló en una frecuencia de 19.0 Hz aproximadamente.

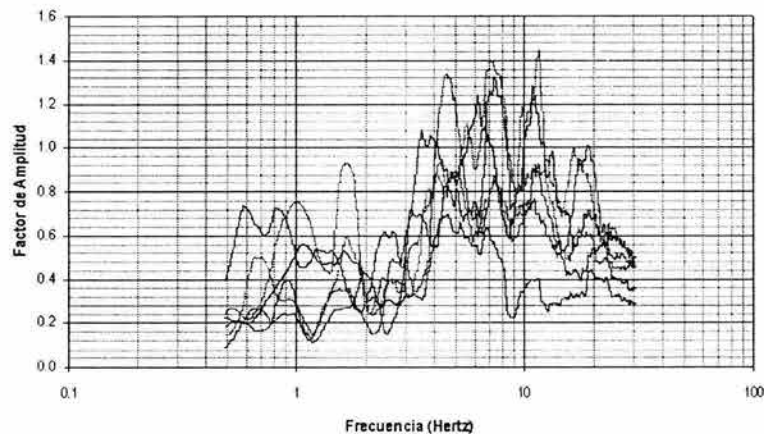


Figura 4.10 - Función de transferencia del deck 2 a la corona testigo.

Esta figura presenta el comportamiento de los sismos registrados por los acelerógrafos 2 y T, localizados en la elevación 49.5 y en la corona de la cortina respectivamente, dichos eventos adoptaron en este caso características de comportamiento similar para un intervalo de frecuencias entre 1.3 y 2.2 Hz, teniendo una frecuencia característica próxima a 1.7 Hz. Se observó que sólo los sismos 98 y 108, cuya descripción se encuentra en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, presentaron otras propiedades, como el desfase de la frecuencia característica citada, por lo cual se excluyen de dicho comportamiento. En este caso el valor de amplificación máximo se presentó para una frecuencia próxima a los 11.0 Hz.

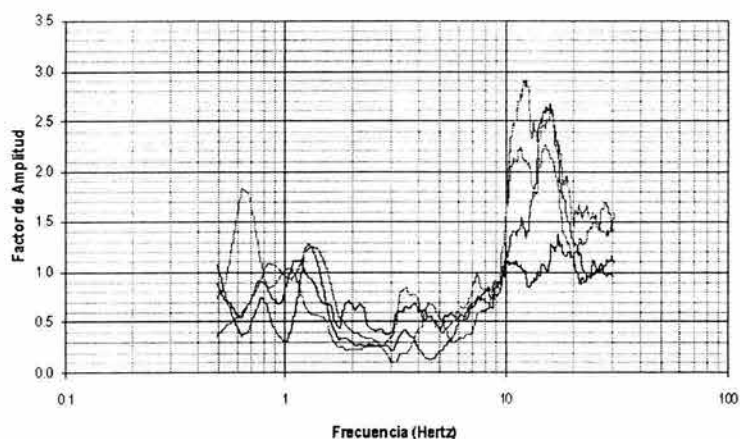


Figura 4.11 - Función de transferencia del inclinómetro 6 a la corona centro.

Esta figura corresponde al registro sísmico de función de transferencia producido por los equipos de medición 6 y C, instalados en el cuerpo de la cortina dentro del inclinómetro 6 a la elevación 30 y en la corona de la cortina respectivamente. Se observa sólo el registro de cuatro fenómenos, de los cuales tres integraron para un intervalo de frecuencias con valor mínimo de 0.9 y máximo de 1.8 Hz un comportamiento común cuya frecuencia característica se dio para 1.3 Hz aproximadamente, sólo el sismo 119 presentó diferencias respecto a las características mencionadas. Se observa que la amplificación máxima se dio para una frecuencia cercana a los 11.0 Hz.

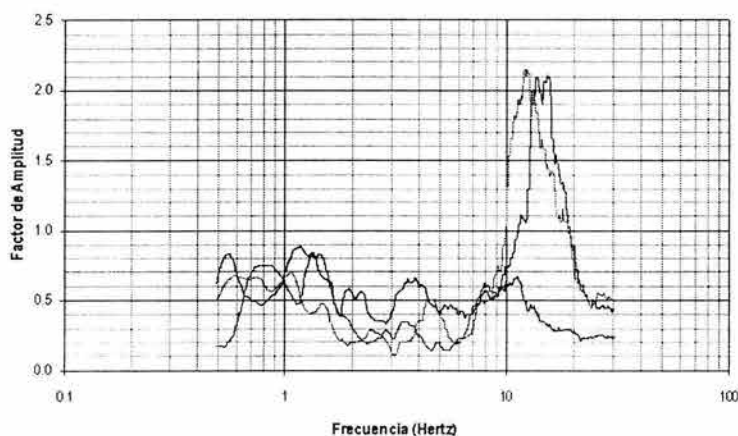


Figura 4.12 - Función de transferencia del inclinómetro 6 a la corona testigo.

La figura 4.12 representa al registro sísmico de función de transferencia de los fenómenos captados del acelerógrafo 6 al T, instalados dentro del inclinómetro 6 en la elevación 30 y en la corona de la estructura, respectivamente. Se nota un comportamiento común para dos de los tres sismos involucrados, cuya frecuencia característica se aproxima a 1.4 Hz, y esta contenida en el intervalo con valor mínimo de 1.0 y máximo de 2.0 Hz. En este caso sólo el sismo 119 actuó con propiedades distintas a las mencionadas, por lo que se excluye de tal comportamiento. Se observa que el valor de amplificación máximo se manifestó para una frecuencia de 11.0 Hz aproximadamente.

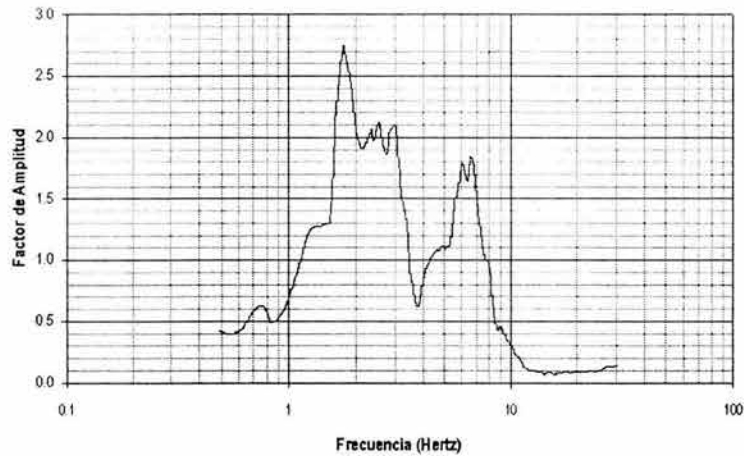


Figura 4.13 - Función de transferencia de la base centro al inclinómetro 6.

La conclusión obtenida a partir de la figura 4.13, que representa al registro sísmico de función de transferencia elaborado por los equipos de medición B y 6, no es muy confiable debido a que sólo contiene un sismo, con el cual no es posible determinar dos tipos de comportamiento que definan si este evento provocó perturbaciones en la cortina.

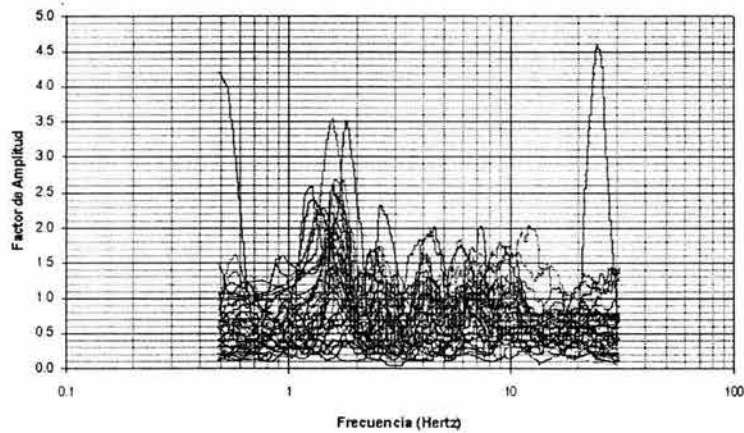


Figura 4.14 - Función de transferencia de la base centro a la corona centro.

Esta figura es una de las más representativas del análisis pues define el comportamiento de una cantidad importante de sismos que fueron registrados de la base a la corona de la cortina (Acelerógrafos B y C). En ella se observa que dichos eventos desarrollaron en general un comportamiento común para un intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.4 Hz, cuya frecuencia característica se manifestó próxima a 1.6 Hz. En este caso se detectó que los sismos 7, 8, 9, 12, 158, 182, 190, 192, 209 y 214, descritos en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, desarrollaron un comportamiento con propiedades diferentes a las mencionadas. Además se observa que la amplitud máxima se presentó para una frecuencia de 24.0 Hz aproximadamente.

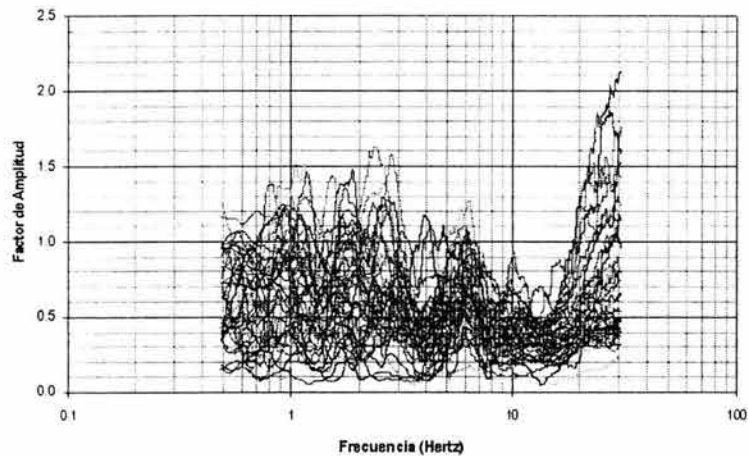


Figura 4.15 - Función de transferencia en la base de la cortina.

Mediante esta figura se puede interpretar el registro sísmico de función de transferencia generado por los acelerógrafos B y F, ambos localizados en una berma de la estructura a la elevación 13.5. Se observa un comportamiento común para la mayoría de estos eventos, caracterizado por un intervalo de frecuencias comprendido entre 0.8 y 1.9 Hz, y una frecuencia característica cercana a 1.2 Hz. En este caso sólo los sismos 133, 139, 143, 156, 158, 164 y 165 manifestaron un comportamiento diferente al de las especificaciones mencionadas. Respecto a las amplificaciones máximas correspondientes a este registro, se observa que fueron generadas en frecuencias superiores a los 30.0 Hz.

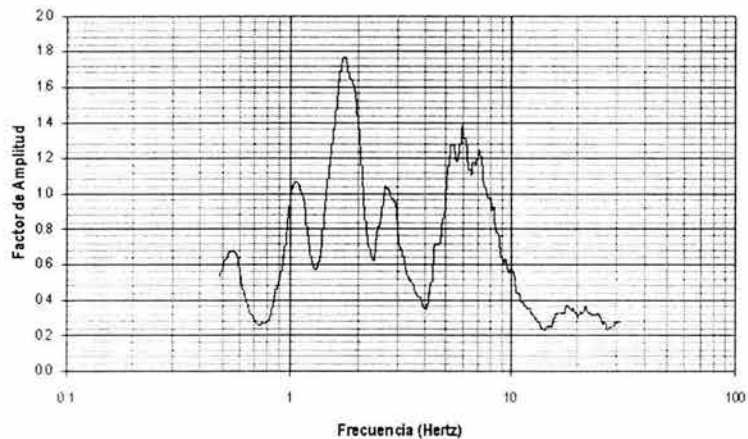


Figura 4.16 - Función de transferencia de la base centro hacia aguas abajo en la corona.

Igual que en la figura 4.13, la arriba mostrada, como resultado del registro sísmico de función de transferencia elaborado por los instrumentos de medición B y G, presenta un sólo evento sísmico, el cual no es suficiente para describir el comportamiento desarrollado.



Capítulo IV – Análisis dinámico

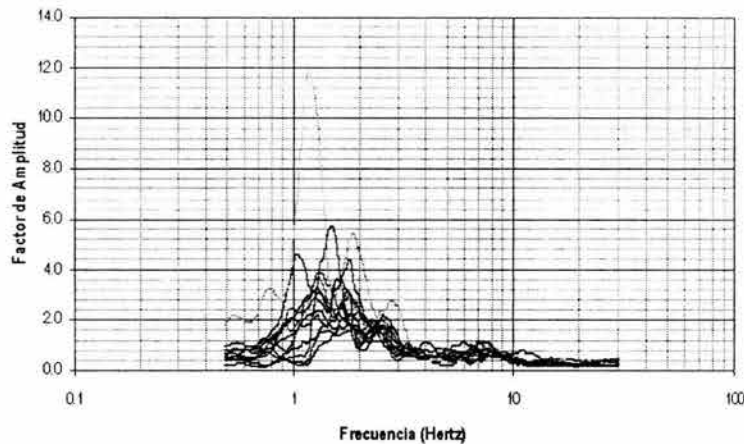


Figura 4.17 - Función de transferencia de la base centro al inclinómetro P.

La figura 4.17 permite analizar el comportamiento de los sismos registrados del acelerógrafo B al P. Se observa que en general dichos eventos adquirieron un comportamiento común definido por un intervalo de frecuencias comprendido entre 0.9 y 2.3 Hz, teniendo como valor característico el de 1.4 Hz. También se distinguen algunos fenómenos que desarrollaron un comportamiento con propiedades diferentes a las citadas, dichos sismos están detallados en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II y se pueden identificar por los números 152, 153, 154 y 155. En este caso la amplificación máxima se manifestó para una frecuencia de 1.2 Hz aproximadamente.

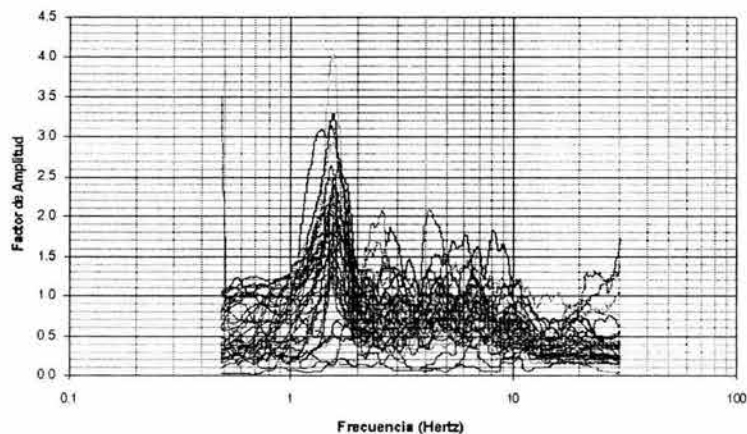


Figura 4.18 - Función de transferencia de la base centro a la corona testigo.

La figura arriba expuesta corresponde al registro sísmico de función de transferencia elaborado por los instrumentos de medición B y T, instalados en la elevación 13.5 y en la corona de la cortina respectivamente. Se observa que mayoritariamente los sismos desarrollaron un comportamiento común definido por un intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.7 Hz, y una frecuencia característica próxima a 1.5 Hz, en la cual se presentó el valor de amplitud máximo, únicamente los sismos 153, 206 y 216 se desligaron de este comportamiento al no adoptar estas propiedades.



Capítulo IV – Análisis dinámico

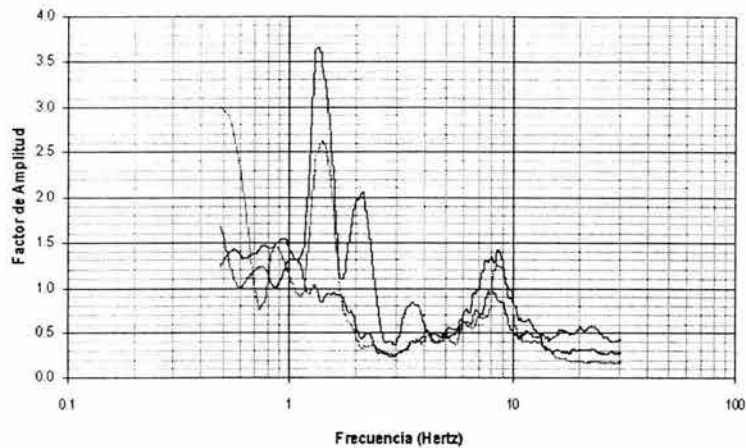


Figura 4.19 - Función de transferencia de la base al deck 1.

La figura 4.19 es el resultado de los sismos registrados de la base (cadenamiento 0+355) a la elevación 35 mediante los acelerógrafos F y 1, se observa en este caso el registro de tres eventos, de los cuales dos adquirieron para un intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 1.9 Hz un comportamiento común, con una frecuencia característica próxima a 1.3 Hz y correspondiente al valor de amplificación máximo. Únicamente el sismo 110 presentó propiedades diferentes a las mencionadas anteriormente.

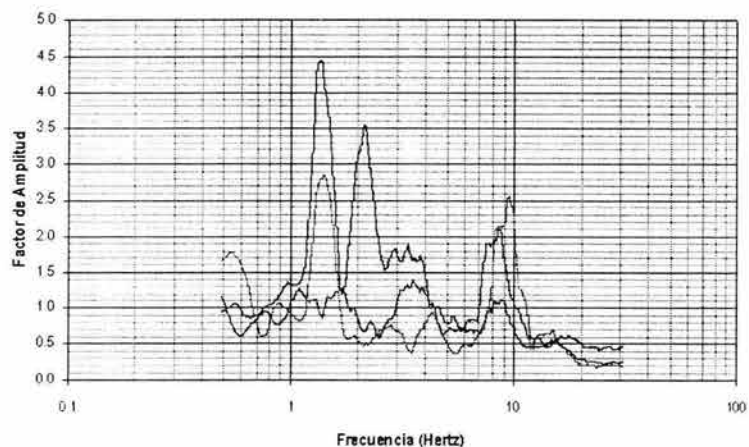


Figura 4.20 - Función de transferencia de la base al deck 2.

Para el registro sísmico de función de transferencia, presentado mediante la figura 4.20 y derivado de los equipos de medición F y 2, que se ubican en las elevaciones 13.5 y 49.5 respectivamente, se observó un comportamiento común para la mayoría de los sismos, caracterizado por un intervalo de frecuencias con valores mínimo y máximo de 1.0 y 1.9 Hz, aproximadamente, y una frecuencia característica cercana a 1.4 Hz, en la cual se manifestó la amplificación máxima del registro. En este caso se excluye de tal comportamiento al sismo 110 por exhibir características diferentes a las comentadas.



Capítulo IV – Análisis dinámico

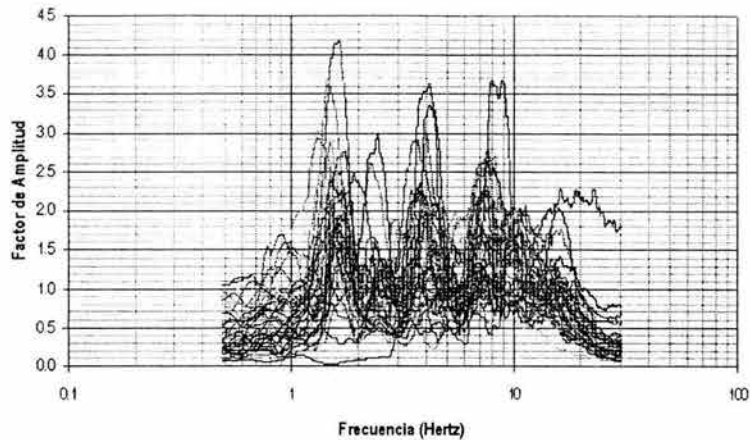


Figura 4.21 - Función de transferencia de la base a la corona centro.

Para el registro sísmico de función de transferencia elaborado por los acelerógrafos F y C, localizados en la base y en la corona de la cortina respectivamente, se observó de manera general un comportamiento común de parte de los sismos, definido por un intervalo de frecuencias comprendido entre 0.8 y 2.8 Hz, teniendo como frecuencia característica un valor de 1.5 Hz aproximadamente, con el cual se desarrolló la amplitud máxima. Para este caso los sismos 163, 166, 173, 180, 182, 183, 192, 204 y 214, ya detallados en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, manifestaron propiedades diferentes a las antedichas, por lo que se excluyen del comportamiento común.

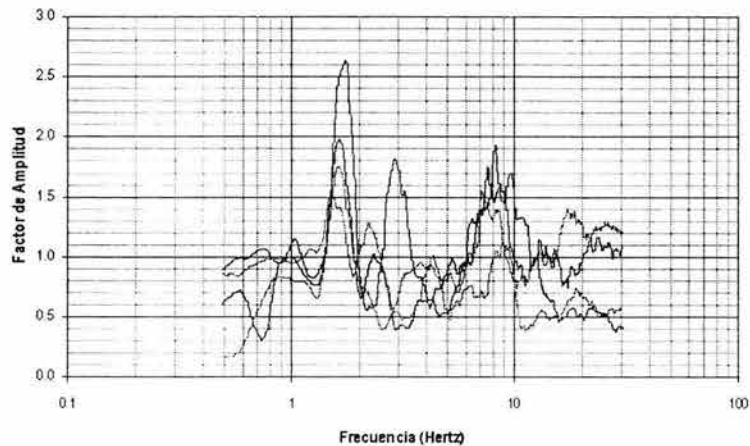


Figura 4.22 - Función de transferencia de la base hacia aguas abajo en la corona.

Esta imagen ayuda a determinar el comportamiento de los eventos sísmicos registrados del acelerógrafo F al G, ubicados en la elevación 13.5 y en la corona de la cortina respectivamente. Se concluye para todos los sismos un comportamiento común definido por un intervalo de frecuencias con valores mínimo y máximo de 1.2 y 2.6 Hz, respectivamente, y una frecuencia característica próxima a 1.7 Hz, con la cual se manifestó el valor de amplitud máximo.



Capítulo IV – Análisis dinámico

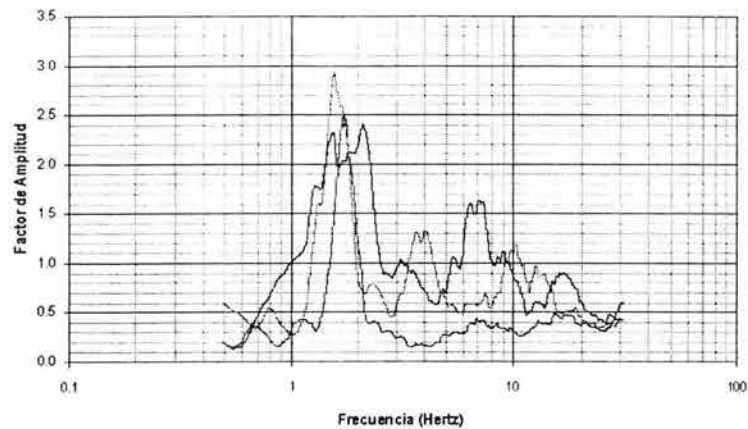


Figura 4.23 - Función de transferencia de la base hacia aguas arriba en la corona.

Con esta figura se evalúa el comportamiento de los sismos registrados del acelerógrafo F al H, mediante el registro sísmico de función de transferencia generado por dichos equipos, se observa que el comportamiento desarrollado fue común para todos los eventos y se caracterizó por un intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.4 Hz, y una frecuencia característica próxima a 1.6 Hz, con la cual se generó la amplificación máxima de este registro.

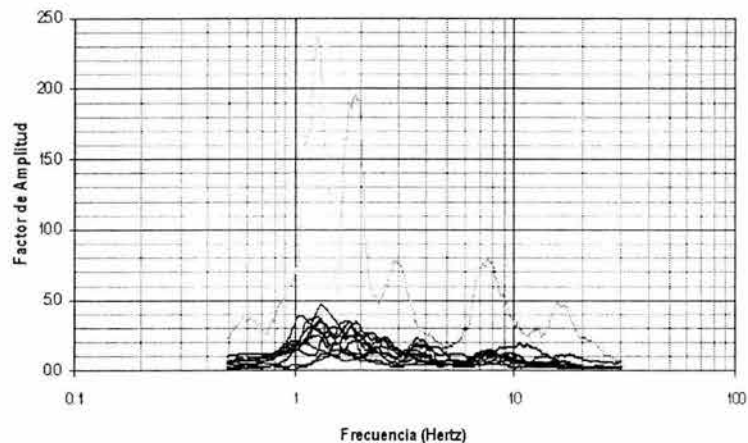


Figura 4.24 - Función de transferencia de la base al inclinómetro P.

La figura 4.24, describe al registro sísmico generado por los instrumentos F y P. Lo más destacable a primera vista resulta ser el sismo 153, debido al alto valor de amplitud alcanzado para una frecuencia de 1.3 Hz aproximadamente, frecuencia que para los demás sismos captados representa el valor característico del comportamiento común, adquirido para un intervalo comprendido entre 0.9 y 2.1 Hz. Los sismos que se excluyen de este comportamiento son los descritos en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II mediante los números 136, 138, 152, 153, 154 y 155.



Capítulo IV – Análisis dinámico

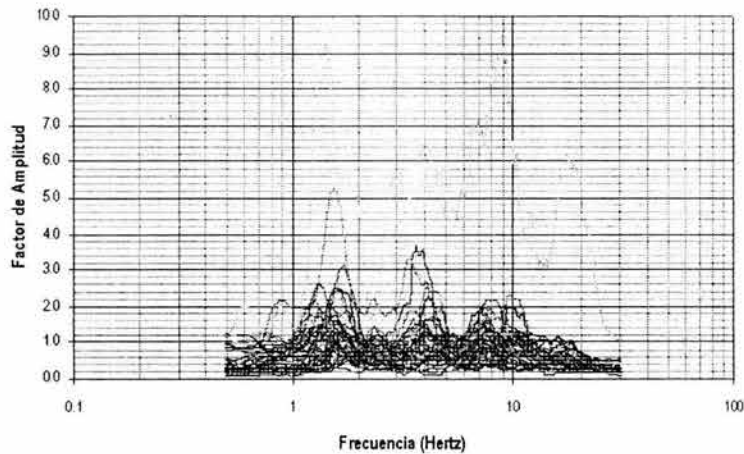


Figura 4.25 - Función de transferencia de la base a la corona testigo.

Nuevamente, como en la figura anterior, este registro sísmico de función de transferencia elaborado por los instrumentos F y T, instalados en la elevación 13.5 y en la corona de la cortina respectivamente, exhibe que el sismo 153 arrojó factores de amplitud elevados para diferentes frecuencias, incluyendo la de 1.4 Hz que para los demás sismos involucrados representa el valor característico del comportamiento común, el cual también tiene como característica el intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.1 Hz. Para este caso se excluyen del comportamiento descrito los sismos 89, 110, 141, 153, 155, 156, 167, 182 y 183, ya que la mayoría presentó defasamientos respecto a la frecuencia característica mencionada.

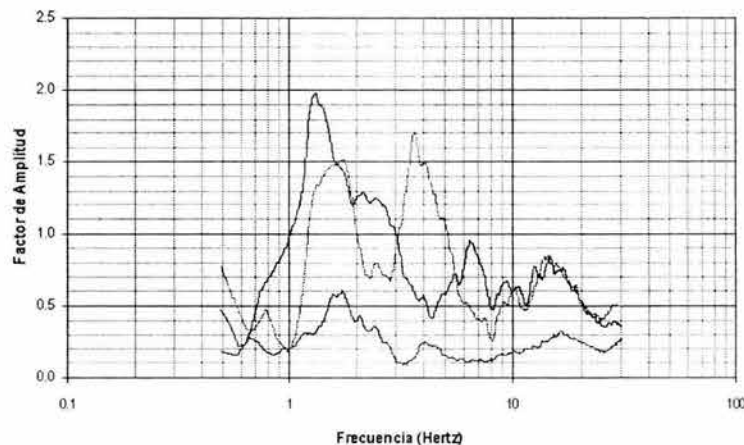


Figura 4.26 - Función de transferencia de aguas abajo hacia aguas arriba en la corona.

Esta figura ilustra el comportamiento de los sismos registrados del instrumento G al H, instalados aguas abajo y aguas arriba al nivel de la corona respectivamente, de acuerdo a la figura el comportamiento desarrollado por los fenómenos sísmicos fue común para un intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.6 Hz, cuya frecuencia característica se acercó a 1.6 Hz. En este caso sólo el sismo 110 presentó un comportamiento con características diferentes a las mencionadas. Para este registro se observó que la amplificación máxima se desarrolló para 1.3 Hz aproximadamente.

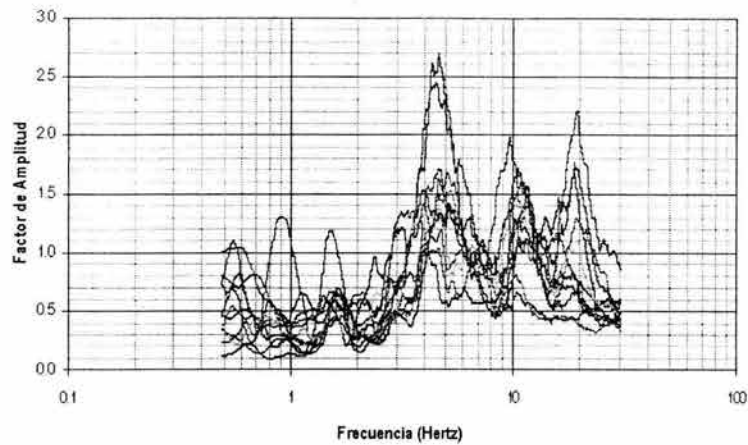


Figura 4.27 - Función de transferencia del inclinómetro P a la corona testigo.

Para el registro sísmico representado por la figura 4.27 y producto de los equipos de medición P y T, se observa de manera general un comportamiento común por parte de los sismos, manifestado para un intervalo de frecuencias con valores mínimo y máximo de 1.1 y 2.0 Hz, respectivamente, y una frecuencia característica próxima a 1.5 Hz. En este caso no se detectó sismo alguno que presentará características diferentes a las mencionadas. Se observa que la amplificación máxima se generó en una frecuencia próxima a los 4.8 Hz.

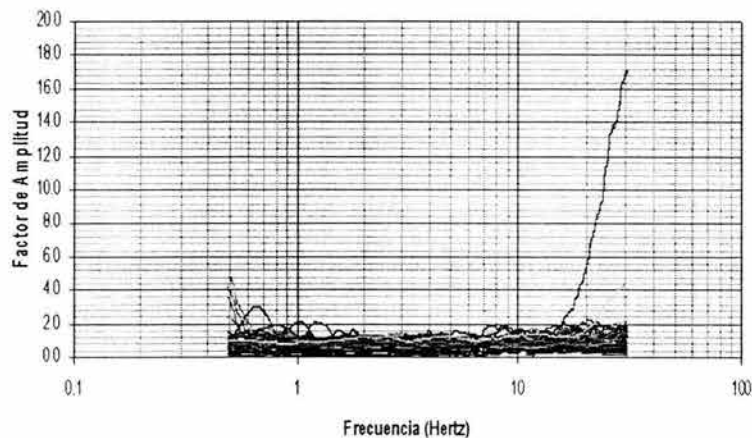


Figura 4.28 - Función de transferencia de la corona testigo a la corona centro.

Mediante esta figura, de la cual resulto difícil determinar las características de los sismos involucrados, se concluyó respecto a la función de transferencia que los sismos registrados del acelerógrafo T al C, instalados ambos en la corona de la cortina, adquirieron mayoritariamente un comportamiento común definido por un intervalo de frecuencias comprendido entre 0.9 y 1.8 Hz, teniendo una frecuencia característica cercana a 1.3 Hz. Los fenómenos sísmicos que desarrollaron un comportamiento con propiedades diferentes a las citadas, se encuentran detallados en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II mediante los números 118, 119, 162, 165, 166, 180, 183, 205, 220 y 221, de los cuales el 220 destaca por haber generado el valor de amplitud máximo para una frecuencia próxima a los 30.0 Hz.

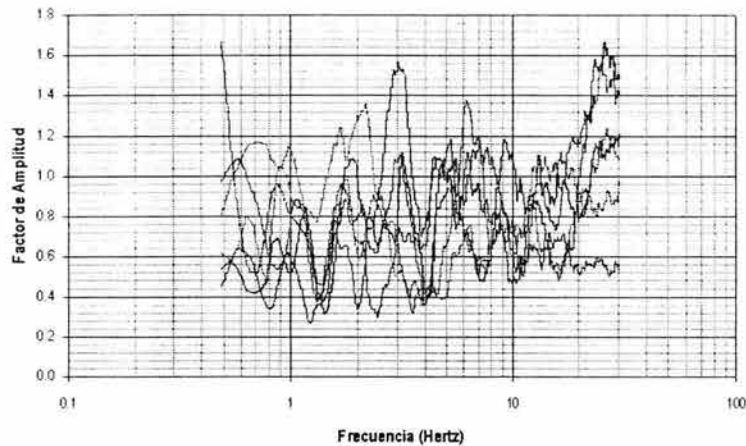


Figura 4.29 - Función de transferencia de la corona testigo hacia aguas abajo en la corona.

Esta figura es el resultado del registro sísmico de los eventos captados del acelerógrafo T al G, instalados ambos en el cuerpo de la cortina al nivel de la corona. Se observa que mayoritariamente los sismos integraron, para un intervalo de frecuencias con valor mínimo de 1.2 y máximo de 2.7 Hz, un comportamiento común cuya frecuencia característica se dio para 1.7 Hz aproximadamente, siendo los sismos 98 y 110 los que presentaron diferencias respecto a las características mencionadas. Se observa que el valor de amplitud máximo se desarrolló para una frecuencia próxima a los 3.0 Hz.

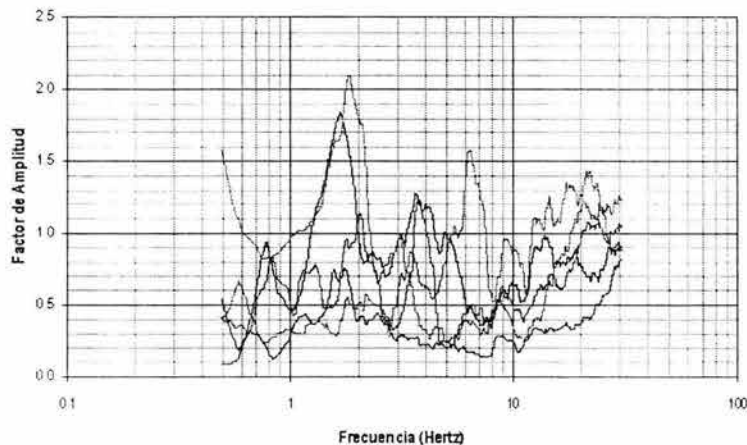


Figura 4.30 - Función de transferencia de la corona testigo hacia aguas arriba en la corona.

Para el registro sísmico de función de transferencia presentado mediante la figura 4.30, que considera los sismos captados del equipo de monitoreo T al H (ambos al nivel de la corona), se observa de manera general un comportamiento común por parte de los sismos, caracterizado por un intervalo de frecuencias comprendido entre 1.1 y 2.8 Hz, y un valor característico próximo a 1.7 Hz, con el cual se manifestó la amplificación máxima de este registro. Únicamente el evento 110 actuó con propiedades distintas, por lo que se excluye del comportamiento definido.



Los resultados más importantes obtenidos a partir del análisis hecho a los registros sísmicos de función de transferencia están referidos tanto a la vibración de la cortina como a la amplificación de los movimientos generados en ella por efecto de los diferentes fenómenos sísmicos considerados.

Respecto a la vibración de la estructura en su componente longitudinal se observó que las frecuencias relacionadas a este fenómeno abarcaron valores que van de los 0.9 a 1.8 Hz, característica que depende de la zona analizada en función de la localización de los diferentes acelerógrafos de la cortina. Si realizamos el análisis seccionando la cortina para definir una parte inferior, considerada desde la base hasta la elevación media de la estructura y una parte superior que vaya desde este punto hasta la corona, podremos distinguir que las frecuencias que provocan la vibración de la parte inferior oscilan entre 1.2 y 1.4 Hz, mientras que la zona superior esta dominada por frecuencias un poco más elevadas que van desde 1.3 hasta 1.8 Hz. Ahora bien de los ochos registros sísmicos que relacionan a la base con la corona se obtuvo que dicha frecuencia varía desde un valor mínimo de 1.4 hasta uno máximo de 1.8 Hz.

Zona Inferior		Zona Superior		Base - Corona		Margen Derecha		Margen Izquierda	
Registro	Frec.	Registro	Frec.	Registro	Frec.	Registro	Frec.	Registro	Frec.
B-6	-	1-C	1.7	B-C	1.6	D-6	2.3	I-1	1.5
B-P	1.4	1-G	1.7	B-G	-	D-B	4.0	I-2	1.4
F-P	1.3	1-H	1.7	B-T	1.5	D-C	1.6	I-6	1.8
F-1	1.3	1-T	1.7	F-2	1.4	D-F	2.0	I-B	2.0
B-F	1.2	2-1	0.9	F-C	1.5	D-G	1.8	I-C	1.7
		2-C	1.7	F-G	1.8	D-I	8.0	I-F	2.1
		2-G	1.7	F-H	1.6	D-P	1.3	I-G	1.7
		2-H	1.8	F-T	1.4	D-T	1.5	I-H	1.8
		2-T	1.7			E-B	1.6	I-P	1.3
		6-C	1.3			E-C	1.6	I-T	1.6
		6-T	1.4			E-D	22.0		
		P-T	1.5			E-F	1.8		
		G-H	1.6			E-G	1.8		
		T-C	1.3			E-H	1.6		
		T-G	1.8			E-I	9.0		
		T-H	1.6			E-P	1.5		
						E-T	1.6		

Tabla 4.1 – Frecuencias características en la presa José María Morelos.

La variación de valores que presentan estas frecuencias puede deberse tanto a las características de los fenómenos sísmicos (magnitud, profundidad focal o la distancia del epicentro a la presa), como a las características y distribución de los materiales y la geometría de la cortina.

Se observa en la tabla 4.1 que los sismos registrados en la roca de las márgenes derecha e izquierda, causan desplazamientos para frecuencias mayores a las detectadas para el cuerpo de la cortina, incluso destacan los casos donde se relacionan directamente ambas márgenes, pues se observan frecuencias características de 8.0, 9.0 y 22.0 Hz, con lo cual se elimina cualquier posibilidad de adquirir el fenómeno de resonancia, ya que según estudios anteriores (León, 1979), la frecuencia característica de la cortina es igual a 1.32 Hz, valor obtenido a partir del análisis en el que se consideraron las tres componentes de movimiento. Cabe destacar que sobre la margen derecha el comportamiento de los sismos se ve influenciado por las obras de generación y excedencias, que se encuentran en los extremos sureste y suroeste respectivamente de la estación acelerográfica D, tomando como referencia el eje de la cortina.



Respecto a la amplificación de los movimientos longitudinales que adopta la presa durante la ocurrencia de un sismo, se observó que en la zona superior de la estructura los factores de amplitud mayores a 3 se desarrollaron para frecuencias arriba de los 3.5 Hz, destacando un valor de 17 registrado por el acelerógrafo de la corona centro y desarrollado para una frecuencia de 30.0 Hz aproximadamente, que sin embargo, no resulta tan confiable debido a la incertidumbre del movimiento relativo entre la cortina y la caseta donde se encuentra dicho instrumento.

La zona inferior presentó amplificaciones muy elevadas para frecuencias menores a 1.5 Hz, estos valores de amplitud alcanzaron cifras de 12 y 23 para frecuencias de 1.2 y 1.3 Hz respectivamente, que se aproximan a la frecuencia característica de la zona, por lo que pudieron haber sido manifestaciones debidas al fenómeno de resonancia, o bien, por las características del sismo 153 (25 – enero – 1996) que fue el causante de ambos valores.

En cambio de los registros que relacionan directamente a la base con la corona de la cortina se observó que la mayoría de los factores de amplificación mayores a 3, se debieron a los valores de frecuencia característicos que van desde 1.4 hasta 1.8 Hz, por lo que en este caso pudiera hablarse más atinadamente del fenómeno de resonancia.

En cualquiera de los casos se observa que los factores de amplificación aumentan ligeramente en proporción a la magnitud de los sismos, por ejemplo los sismos 108, 110 y 111 con magnitudes de 4.7, 4.8 y 4.4 grados Richter respectivamente provocaron factores de amplitud menores a 3, mientras que sismos como el 12, 153 y 192 con magnitudes de 5.2, 5.3 y 6.5 grados Richter generaron amplificaciones con factores mayores a 4.5, llegando incluso a observarse valores de amplitud iguales a 9.2, 12 y 23. En general y sobretodo para la zona superior se observó que las amplificaciones máximas fueron manifestadas mediante frecuencias de excitación diferentes a las características, hecho que descarta para estos casos el desarrollo del fenómeno de resonancia. Respecto a las márgenes de la presa se observó que los factores máximos de amplificación se desarrollaron para frecuencias bajas, en general para valores cercanos a 1.5 Hz

En seguida se presenta un resumen de los sismos que fueron detectados a través de los registros sísmicos presentados de la figura 4.2 a la 4.30 como aquellos que generaron alteraciones en la estructura.

Sismo	Zonas de afectación	Sismo	Zonas de afectación	Sismo	Zonas de afectación
7	Base y corona	138	Base y altura media	167	Base y corona
8	Base y corona	139	Base	173	Base y corona
9	Base y corona	141	Base y corona	180	Base y corona
12	Base y corona	143	Base	182	Base y corona
98	Altura media y corona	152	Base y altura media	183	Base y corona
89	Base y corona	153	Base, altura media y corona	190	Base y corona
101	Corona	154	Base y altura media	192	Base y corona
108	Corona	155	Base, altura media y corona	205	Corona
109	Altura media y corona	156	Base y corona	204	Base y corona
110	Base, altura media y corona	158	Base y corona	206	Base y corona
112	Altura media y corona	162	Corona	209	Base y corona
118	Corona	163	Base y corona	214	Base y corona
119	Altura media y corona	164	Base	216	Base y corona
133	Base	165	Base y corona	220	Corona
136	Base y altura media	166	Base y corona	221	Corona

Tabla 4.2 – Sismos relevantes detectados en las funciones de transferencia



Según la tabla, la zona mayormente afectada por la ocurrencia de fenómenos sísmicos fue la corona de la estructura, en la cual las excitaciones diferentes a las comunes fueron provocadas por un total de 37 sismos, inmediatamente a esta, la zona más fastidiada fue la base, ya que un total de 34 eventos sísmicos provocaron excitaciones diferentes a las comunes y finalmente la zona menos alterada fue la equivalente a la altura media de la cortina ya que sólo se detectaron 11 sismos que generaron excitaciones diferentes a las comunes.

Finalmente del análisis de las funciones de transferencia se concluye que el valor de la frecuencia característica, que participa en la amplificación de los movimientos longitudinales de la estructura, se encuentra próxima a un valor de 1.5 Hz, la cual es similar al valor de 1.32 Hz, obtenido en trabajos anteriores (León, 1979) y en los cuales fueron consideradas las tres componentes de movimiento.

4.2 – ANGULOS DE FASE

El ángulo de fase ϕ , representa la distancia angular que está retrasada la respuesta respecto al desplazamiento. El ángulo de fase $\phi_{xy}(f)$ del 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:

$$\varepsilon = \frac{\phi_{xy}(f)}{2\pi f} \dots\dots (4.3)$$

A continuación se presentan las figuras que ilustran los registros sísmicos de ángulo de fase elaborados por los diferentes equipos de medición instalados en el cuerpo de la cortina. La finalidad perseguida es detectar todos aquellos sismos que provocaron ángulos de fase mayores a los 90°.

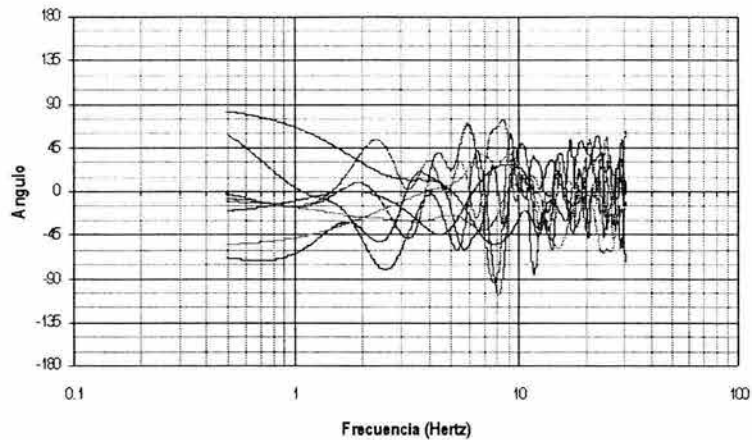


Figura 4.31 - Ángulo de fase del deck 1 a la corona centro.

La figura 4.31 presenta el registro de los sismos captados del acelerógrafo 1 al C, se detectó que los sismos de menor magnitud presentaron concentraciones con cambios de signo para frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, intervalo en el cual se manifestaron ángulos de fase menores a los 70° , mientras que los sismos de mayor magnitud presentaron una concentración más densa con cambios de signo arriba de los 3.0 Hz. Únicamente los sismos 110 y 111 excedieron los 90° para una frecuencia próxima a los de 8.0 Hz.

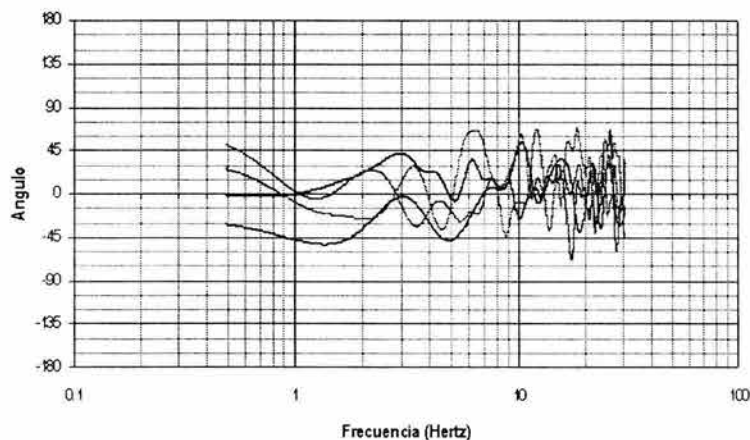


Figura 4.32 - Ángulo de fase del deck 1 hacia aguas abajo en la corona.

El registro sísmico de ángulo de fase representado por la figura 4.32 muestra los eventos sísmicos captados de la elevación 35 a la corona de la cortina mediante los equipos de medición 1 y G. En este caso los sismos de mayor magnitud presentaron concentraciones con cambios de signo para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, intervalo en el que los valores de ángulo de fase fueron menores a los 60° y sólo el sismo de menor magnitud de este registro desarrolló su cambio de signo para una frecuencia mayor a los 3.0 Hz. Se observa además que ningún sismo excede los 90° .

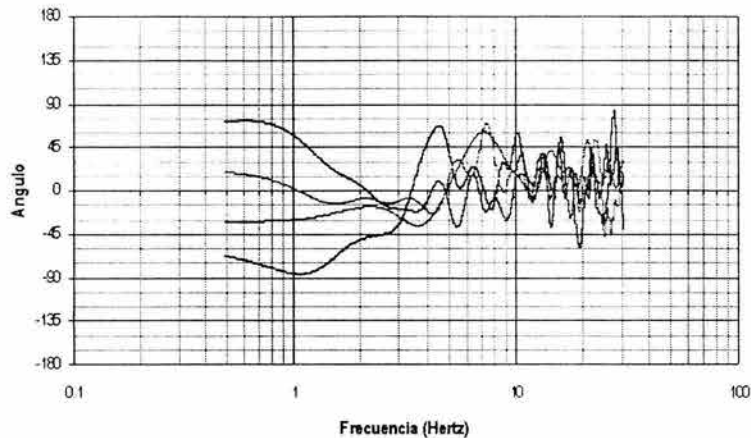


Figura 4.33 - Ángulo de fase del deck 1 hacia aguas arriba en la corona.

En función de lo presentado en el registro sísmico de la figura 4.33, cuyos sismos fueron captados del instrumento de medición 1 al H, se concluye que el fenómeno de menor magnitud desarrolló su cambio de signo para una frecuencia comprendida entre 1.0 y 2.0 Hz, intervalo en el cual se desarrollaron ángulos de fase menores a los 90°, los demás sismos tuvieron una magnitud mayor y concentraron sus cambios de signo para frecuencias mayores a los 2.0 Hz. En esta ocasión ningún evento excedió los 90°.

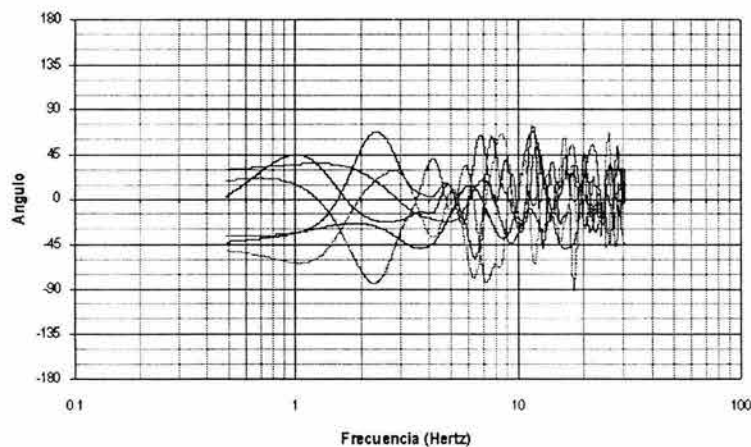


Figura 4.34 - Ángulo de fase del deck 1 a la corona testigo.

Para el registro sísmico de ángulo de fase 1 – T, cuyos equipos se localizan en la elevación 35 y en la corona de la cortina, se detectó que los fenómenos sísmicos en general presentaron concentraciones con cambios de signo para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, intervalo en el cual los ángulos de fase tuvieron valores menores a los 60°. Únicamente el sismo 106 desarrolló para una frecuencia cercana a los 18.0 Hz un defasamiento mayor a los 90°.



Capítulo IV – Análisis dinámico

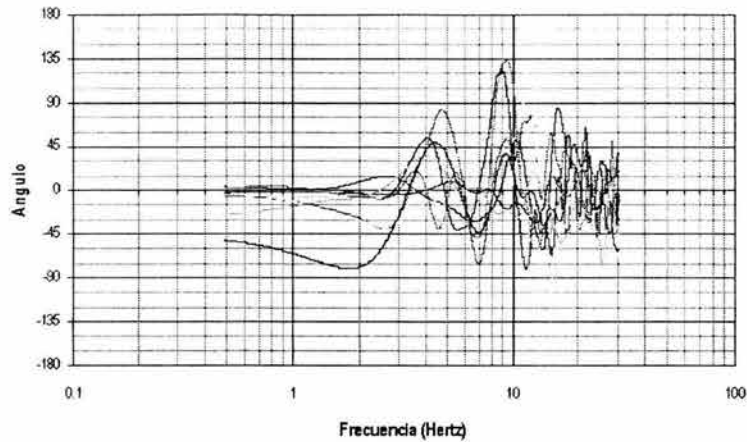


Figura 4.35 - Ángulo de fase del deck 2 al deck 1.

Este registro sísmico de ángulo de fase es el resultado del monitoreo realizado por los instrumentos 2 y 1, instalados ambos dentro de un inclinómetro del núcleo impermeable en las elevaciones 49.5 y 35 respectivamente. De la figura se detectó que los eventos de menor magnitud presentaron una concentración densa con cambios de signo en frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, intervalo en el cual los valores de ángulo de fase fueron en general menores a 30°, sólo uno de ellos alcanzó valores próximos a los 75° dentro de este intervalo, a diferencia de lo anterior, los sismos de mayor magnitud de este registro concentraron sus cambios de signo para frecuencias mayores a los 3.0 Hz. En este caso los sismos 108, 110 y 111 excedieron los 90° para frecuencias mayores a 8.0 Hz.

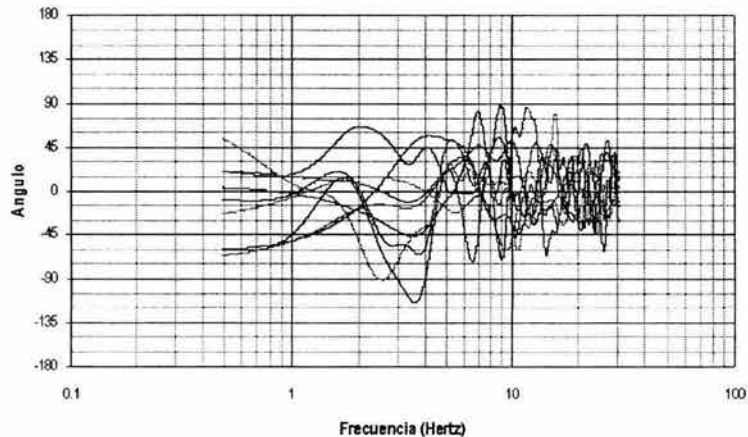


Figura 4.36 - Ángulo de fase del deck 2 a la corona centro.

Esta figura representa al registro sísmico elaborado por los acelerógrafos 2 y C, localizados en la elevación 49.5 y en la corona de la cortina respectivamente, mayoritariamente los fenómenos de menor magnitud presentaron concentraciones con cambios de signo para frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, intervalo donde los ángulos de fase tuvieron valores menores a los 60°; distintamente, los sismos de mayor magnitud desarrollaron sus cambios de signo para frecuencias mayores a los 2.0 Hz. Se observó además que los sismos 98 y 111 presentaron defasamientos mayores a los 90° para frecuencias mayores a los 2.0 Hz.

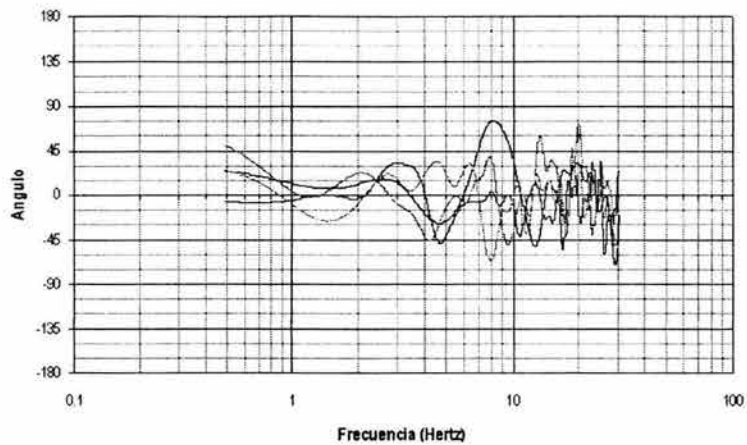


Figura 4.37 - Angulo de fase del deck 2 hacia aguas abajo en la corona.

La figura 4.37 representa al registro sísmico de ángulo de fase de los sismos captados del acelerógrafo 2 al G, en dicha figura se detectó que los sismos de mayor magnitud concentraron sus cambios de signo en frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, intervalo en el cual los valores de ángulo fueron menores a los 30° , en este caso el sismo de menor magnitud presentó su cambio de signo para una frecuencia mayor a los 3.0 Hz. No se observan, para sismo alguno, ángulos de fase mayores a los 90° .

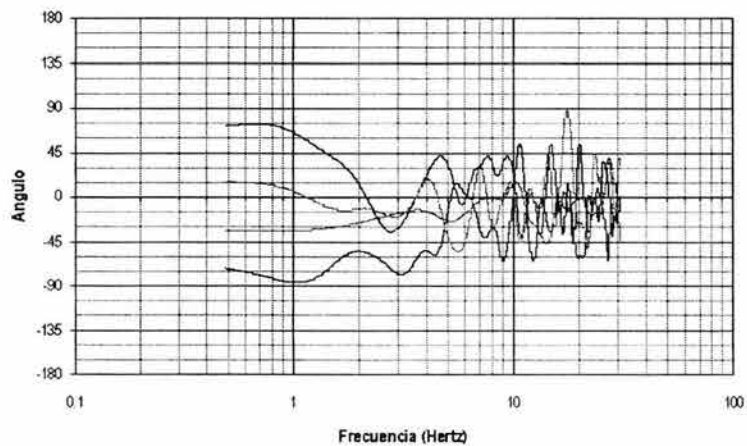


Figura 4.38 - Angulo de fase del deck 2 hacia aguas arriba en la corona.

Esta figura corresponde al registro sísmico elaborado por los instrumentos 2 y H, instalados en la elevación 49.5 y en la corona de la cortina respectivamente. Se observó que para el intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.0 Hz, los valores de ángulo de fase fueron menores a los 90° , además fue en este intervalo donde el sismo de menor magnitud presentó su cambio de signo, mientras que los sismos de mayor magnitud lo hicieron para frecuencias mayores a los 2.0 Hz. En este caso no se detectaron valores de ángulo mayores a los 90° .

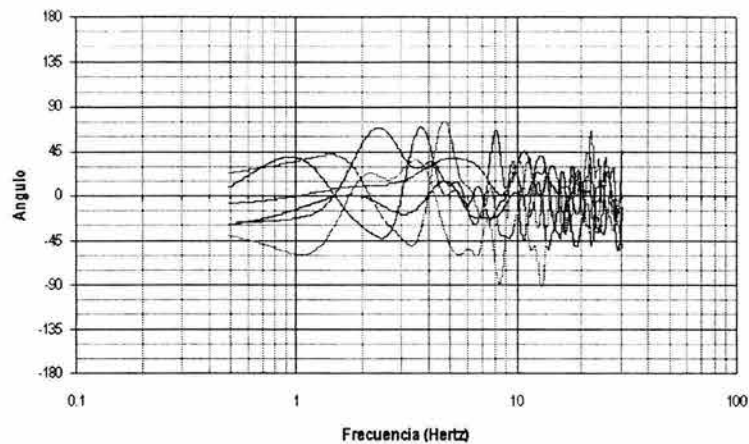


Figura 4.39 - Ángulo de fase del deck 2 a la corona testigo.

Para el registro sísmico de ángulo de fase presentado mediante la figura 4.39, se encontró que de los sismos captados de la elevación 49.5 a la corona, los de menor magnitud presentaron concentraciones con cambios de signo en frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, intervalo en el cual los valores de ángulo fueron menores a los 60° , para los sismos de mayor magnitud se observó un pequeño incremento en la frecuencia donde presentaron sus cambios de signo. En este caso únicamente el sismo 110, descrito en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, presentó un defasamiento mayor a los 90° para una frecuencia cercana a los 13.0 Hz.

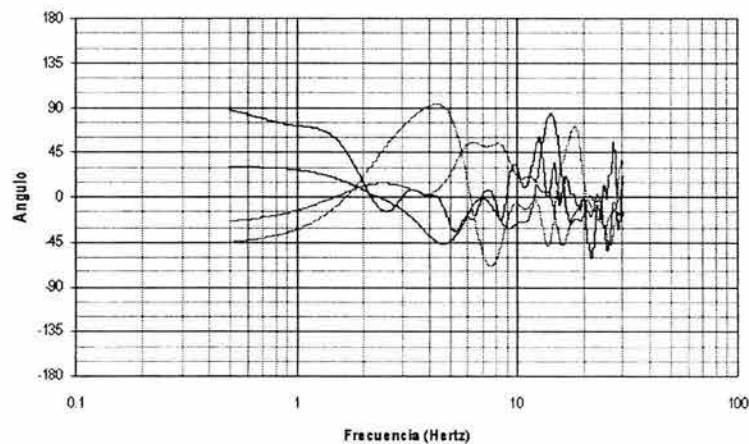


Figura 4.40 - Ángulo de fase del inclinómetro 6 a la corona centro.

Para este registro sísmico de ángulo de fase se determinó que los sismos de menor magnitud captados del instrumento de medición 6 al C, presentaron concentraciones con cambios de signo en frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, mientras que los eventos de mayor magnitud lo hicieron para valores mayores a 2.0 Hz. Respecto a los ángulos de fase observados en el intervalo de 1.0 a 2.0 Hz se observa que estos fueron menores a los 75° . En esta ocasión el sismo 124 presentó para una frecuencia mayor a los 4.0 Hz un defasamiento superior a los 90° .



Capítulo IV – Análisis dinámico

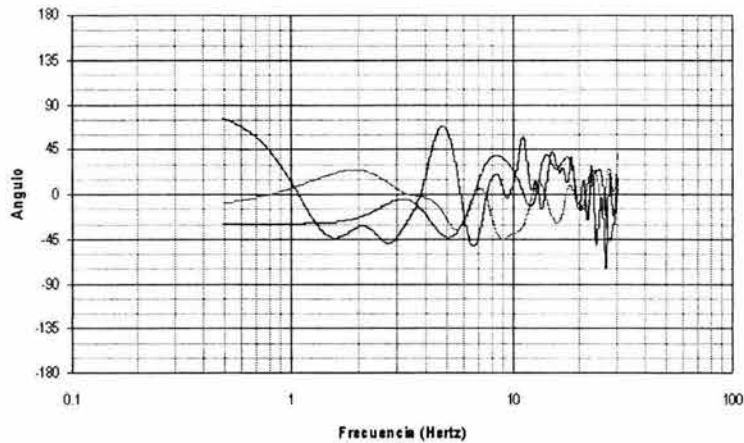


Figura 4.41 - Ángulo de fase del inclinómetro 6 a la corona testigo.

La figura 4.41 representa al registro sísmico de ángulo de fase elaborado por los instrumentos de medición 6 y T, localizados en la elevación 30 y en la corona de la cortina respectivamente, se observan para el intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.0 Hz valores de ángulo menores a los 45°. Respecto a los sismos de mayor magnitud presentados en este registro se detectó que estos concentraron sus cambios de signo para valores comprendidos entre 1.0 y 2.0 Hz, mientras que el sismo de menor magnitud lo hizo para una frecuencia mayor a los 3.0 Hz. En este registro no hubo sismo alguno que excediera los 90°.

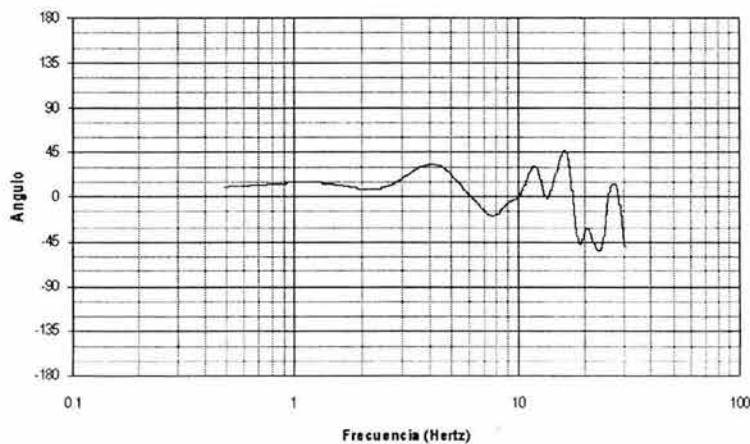


Figura 4.42 - Ángulo de fase de la base centro al inclinómetro 6.

Para el registro sísmico B – 6, cuyos equipos se localizan en las elevaciones 13.5 y 30 respectivamente se observa la captación de un sólo sismo, el cual presentó su cambio de signo para una frecuencia próxima a 6.0 Hz, además se observa que no provocó valores de ángulo mayores a los 60°.



Capítulo IV – Análisis dinámico

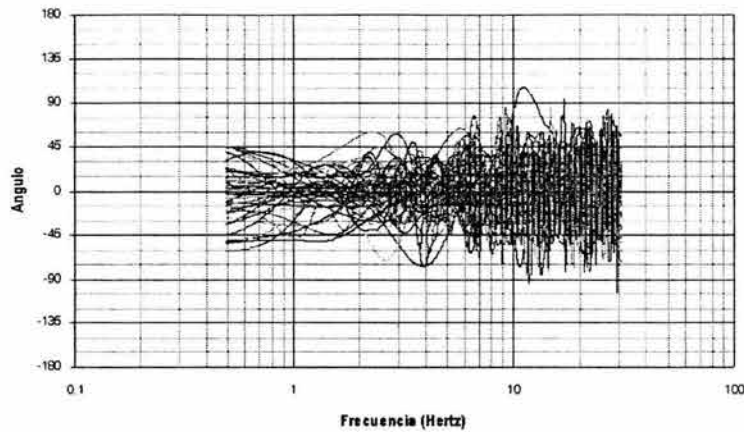


Figura 4.43 - Angulo de fase de la base centro a la corona centro.

Como ya se había observado en la variable función de transferencia de este capítulo, los instrumentos de monitoreo B y C localizados en el cuerpo de la cortina en la elevación 13.5 y en la corona respectivamente, produjeron también para la variable ángulo de fase, uno de los registros más importantes para la evaluación del comportamiento sísmico de la estructura, esto debido a la ubicación de los equipos y a la cantidad de sismos captados. Se detectó que los sismos de mayor magnitud en general concentraron sus cambios de signo para frecuencias mayores a los 3.0 Hz mientras que los de menor magnitud lo hicieron en el intervalo de 1.0 a 2.0 Hz, mismo en el que los valores de ángulo fueron menores a los 60°. En este caso los eventos 17, 158 y 220 presentaron para frecuencias superiores a los 11.0 Hz defasamientos mayores a los 90°.

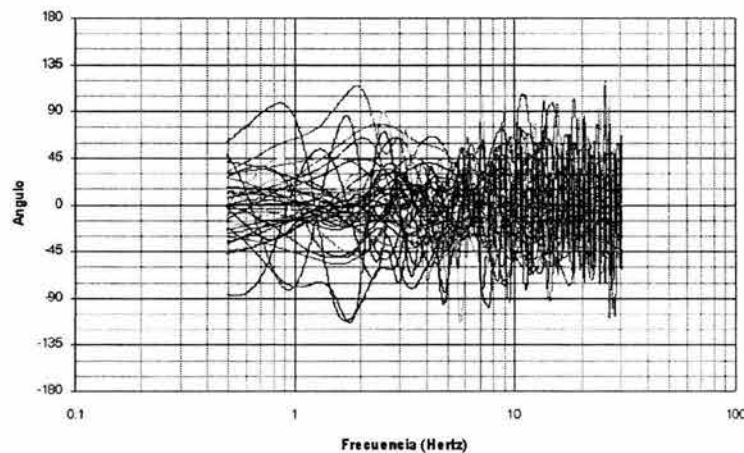


Figura 4.44 - Angulo de fase en la base de la cortina.

La figura 4.44 también representa un registro sísmico de ángulo de fase importante, en esta ocasión producto de los instrumentos B y F instalados ambos en la elevación 13.5. Se encontró que los sismos de menor magnitud presentaron concentraciones con cambio de signo para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, intervalo en el cual algunos sismos excedieron los 90°, mientras que los de mayor magnitud lo hicieron para valores mayores a 3.0 Hz. También se observó que los sismos 141, 145, 156, 158, 162, 165 y 172 manifestaron ángulos mayores a los 90°.

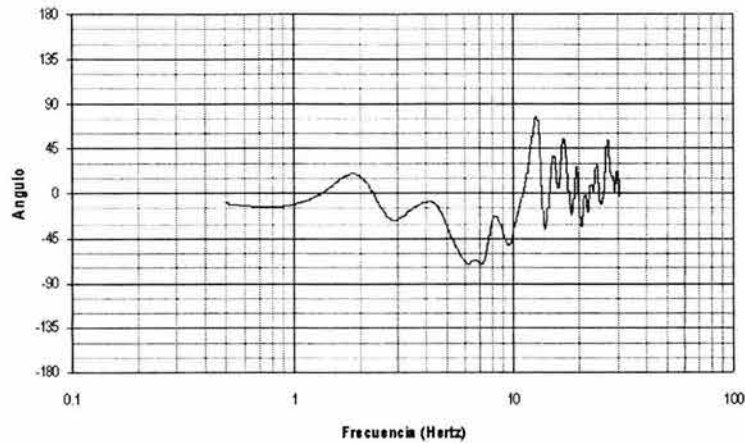


Figura 4.45 - Angulo de fase de la base centro hacia aguas abajo en la corona.

Mediante la figura arriba presentada y con la cual se muestra el registro sísmico de ángulo de fase elaborado por los instrumentos de monitoreo B y G, localizados en la elevación 13.5 y en la corona de la cortina respectivamente, se observó que el único evento captado mantuvo durante su desarrollo valores de ángulo menores a los 90° , incluso para el intervalo de 1.0 a 2.0 Hz, donde desarrolló su cambio de signo, los ángulos fueron menores a los 30° .

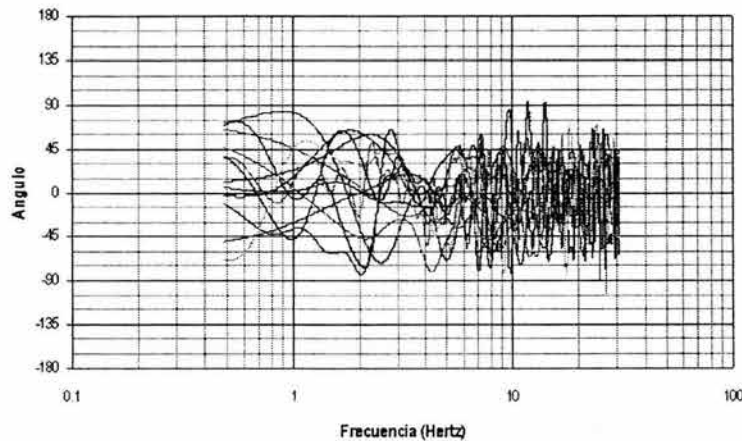


Figura 4.46 - Angulo de fase de la base centro al inclinómetro P.

Para el registro sísmico de ángulo de fase representado por la figura 4.46, cuyos sismos fueron captados del acelerógrafo B al P, se detectó que los eventos de menor magnitud presentaron concentraciones con cambios de signo para frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, intervalo en el que los ángulos de fase tuvieron valores menores a los 75° , distintamente los sismos con mayor magnitud presentaron en general sus cambios de signo para frecuencias superiores a los 3.0 Hz. Sólo los eventos 141 y 151, descritos en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, excedieron los 90° para frecuencias mayores a los 10.0 Hz.



Capítulo IV – Análisis dinámico

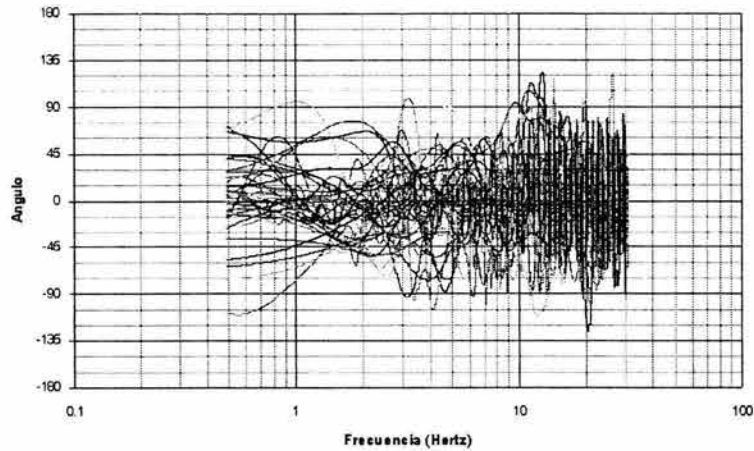


Figura 4.47 - Angulo de fase de la base centro a la corona testigo.

Esta figura corresponde al registro sísmico elaborado por los equipos de monitoreo B y T, ubicados en la elevación 13.5 y en la corona de la cortina. Del análisis hecho se observó que en el intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.0 Hz los sismos provocaron mayoritariamente ángulos de fase menores a los 60°, así mismo los eventos de menor magnitud contenidos en este registro presentaron concentraciones densas con cambios de signo para este mismo intervalo, distintamente, una gran parte de los sismos de mayor magnitud concentraron sus cambios de signo en frecuencias mayores a los 3.0 Hz. Los eventos 130, 134, 141, 145, 153, 156, 162, 165, 166, 182, 183, 203 y 205 excedieron los 90° de ángulo de fase para frecuencias mayores a los 3.0 Hz.

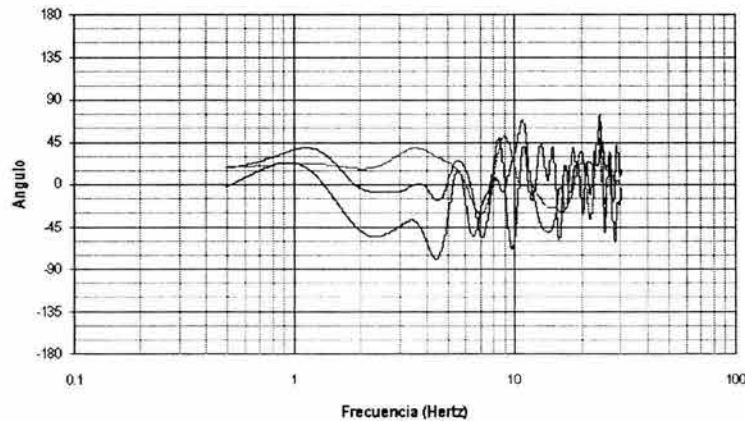


Figura 4.48 - Angulo de fase de la base al deck 1.

Para el registro sísmico de ángulo de fase F – 1, cuyos instrumentos se localizan en las elevaciones 13.5 y 35 respectivamente, se observó que en el intervalo de frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz los ángulos de fase fueron menores a los 45°, además ningún evento presentó valores mayores a los 90°.

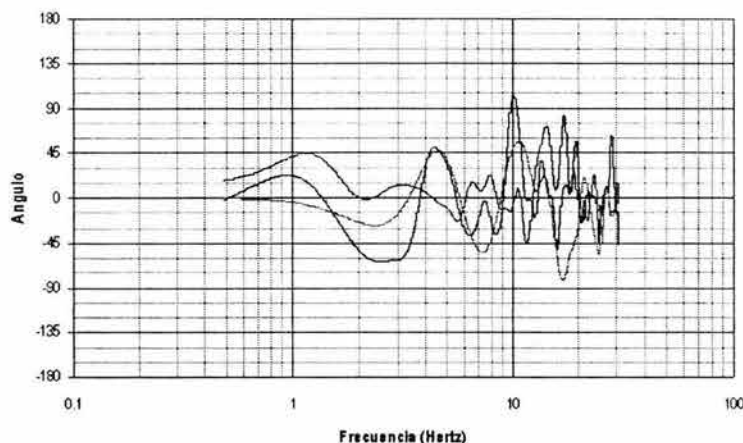


Figura 4.49 - Ángulo de fase de la base al deck 2.

Para el registro sísmico de ángulo de fase, representado por la figura arriba expuesta y derivado de los instrumentos de monitoreo F y 2, instalados en las elevaciones 13.5 y 49.5 respectivamente, se detectó que los fenómenos de mayor magnitud concentraron sus cambios de signo para frecuencias entre 1.0 y 2.0 Hz, intervalo en el cual los ángulos de fase fueron menores a los 60° , mientras que el sismo de menor magnitud presentó su cambio de signo para una frecuencia mayor a los 3.0 Hz. En esta ocasión el evento 110 provocó para una frecuencia próxima a los 10.0 Hz un defasamiento mayor a los 90° .

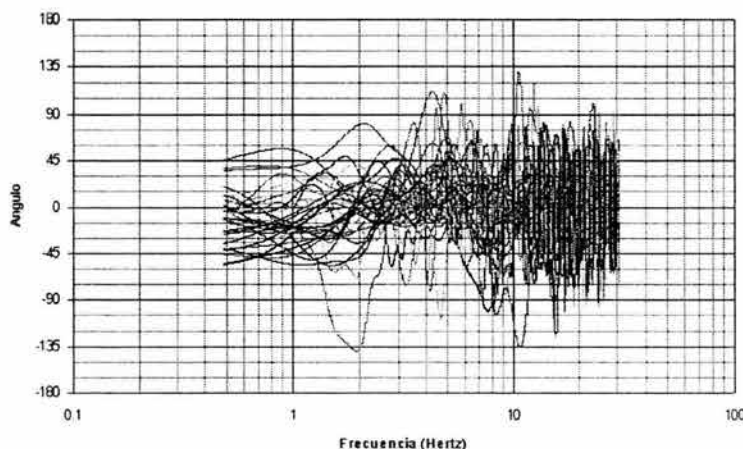


Figura 4.50 - Ángulo de fase de la base a la corona centro.

La figura 4.50 corresponde al registro sísmico de ángulo de fase de los sismos captados del acelerógrafo F al C, localizados en la elevación 13.5 y en la corona de la cortina respectivamente. Se detectó que los sismos de menor magnitud presentaron concentraciones con cambio de signo para valores de 1.0 a 2.0 Hz, intervalo en el que mayoritariamente los ángulos de fase fueron menores a los 60° , sólo el sismo 192 presentó dentro de este intervalo un ángulo mayor a los 90° . Respecto a los sismos de mayor magnitud se encontró que estos concentraron sus cambios de signo para frecuencias mayores a los 3.0 Hz. En esta ocasión los sismos 110, 165, 182, 192, 202, 205 y 214 presentaron defasamientos mayores a los 90° , en general para frecuencias mayores a los 4.0 Hz.

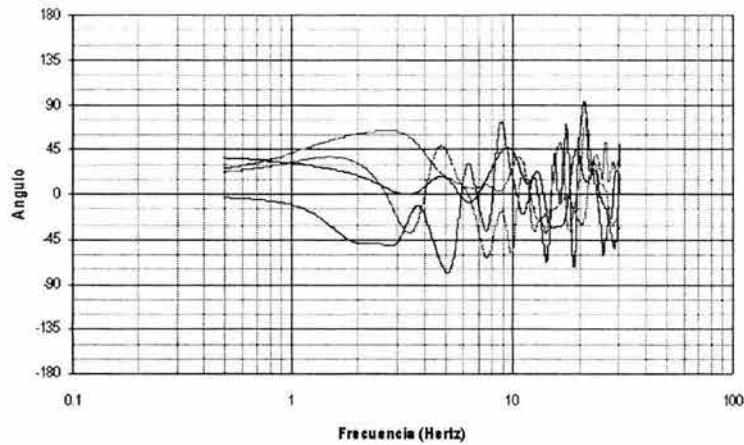


Figura 4.51 - Ángulo de fase de la base hacia aguas abajo en la corona.

El registro sísmico representado por la figura 4.51, muestra los sismos captados del acelerógrafo F al G, instalados en la elevación 13.5 y en la corona de la cortina respectivamente. Se detectó mediante la figura que los sismos de mayor magnitud desarrollaron sus cambios de signo en frecuencias mayores a los 3.0 Hz, sólo el sismo 108 de menor magnitud lo hizo para una frecuencia menor a este valor. Respecto a los valores de ángulo de fase correspondientes al intervalo de frecuencias entre 1.0 y 2.0 Hz se observó que estos fueron menores a los 60°. En este registro el sismo 89 presentó para una frecuencia mayor a los 20.0 Hz un defasamiento mayor a los 90°.

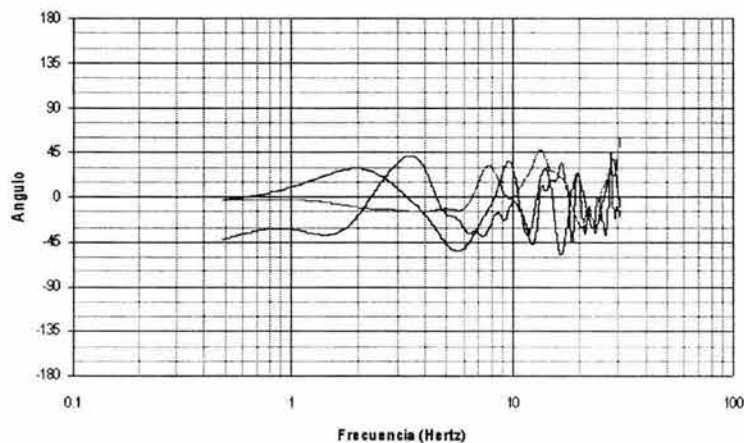


Figura 4.52 - Ángulo de fase de la base hacia aguas arriba en la corona.

La figura arriba mostrada corresponde al registro sísmico de ángulo de fase producto de los equipos de monitoreo F y H que se localizan en la elevación 13.5 y en la corona de la cortina respectivamente, se observó que para el intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.0 Hz los valores de ángulo fueron menores a los 45°, también se detectó que los sismos de menor magnitud presentaron sus cambios de signo para frecuencias mayores a los 3.0 Hz, mientras que el sismo de mayor magnitud lo hizo para una frecuencia aproximada de 2.2 Hz. En esta ocasión ningún fenómeno provocó valores de ángulo mayores a los 90°.

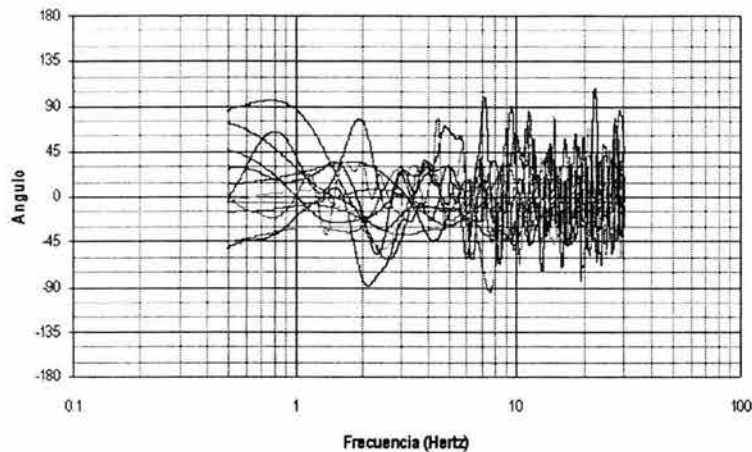


Figura 4.53 - Ángulo de fase de la base al inclinómetro P.

La figura 4.53 representa al registro sísmico de ángulo de fase generado por los instrumentos de monitoreo F y P, mediante la imagen se observó que para el intervalo de frecuencias entre 1.0 y 2.0 Hz los valores de ángulo fueron en general menores a los 45° . Respecto a los sismos de menor magnitud presentados en este registro se detectó que concentraron sus cambios de signo para frecuencias menores a los 2.0 Hz, mientras que los de mayor magnitud lo hicieron para frecuencias mayores a este valor. En esta ocasión los eventos 136, 141, 145 y 156 presentaron defasamientos mayores a los 90° para frecuencias mayores a los 7.0 Hz.

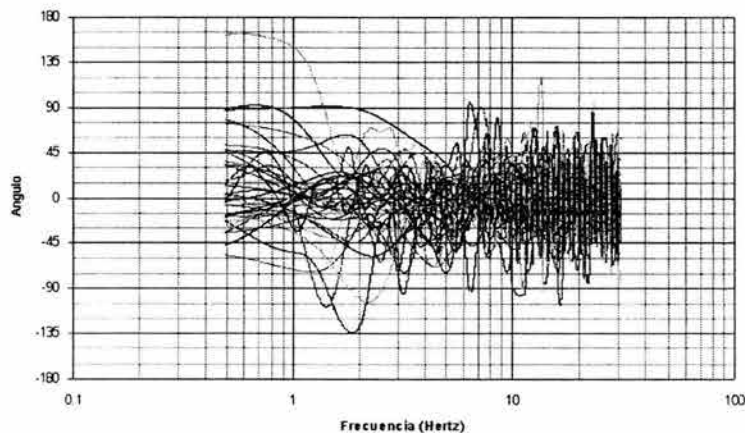


Figura 4.54 - Ángulo de fase de la base a la corona testigo.

Para el registro sísmico de ángulo de fase elaborado por los instrumentos de monitoreo F y T, cuyos eventos fueron captados de la elevación 13.5 a la corona de la cortina, se observaron, para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz valores de ángulo en general menores a los 60° , pero también hubieron algunos eventos que provocaron valores mayores a los 90° . En cuanto a los sismos de menor magnitud incluidos en este registro, se detectó que estos presentaron concentraciones con cambios de signo para frecuencias menores a los 2.0 Hz, mientras que los sismos de mayor magnitud lo hicieron para frecuencias superiores a este valor. En este caso los sismos 89, 134, 141, 145, 151, 155, 162, 165 y 167 causaron ángulos mayores a los 90° , manifestados en diferentes frecuencias.

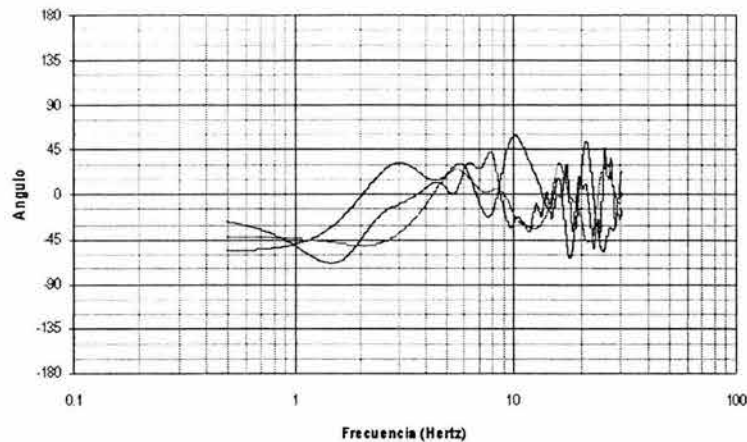


Figura 4.55 - Ángulo de fase de aguas abajo hacia aguas arriba en la corona.

Esta figura ilustra el comportamiento de los sismos captados del acelerógrafo G al H, se observa que dentro del intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.0 Hz los valores de ángulo de fase se mantuvieron por debajo de los 75°, además se identificó que los sismos de mayor magnitud incluidos en este registro presentaron sus cambios de signo para frecuencias mayores a los 3.0 Hz, no así el de menor magnitud pues su cambio de signo se dio para una frecuencia cercana a 1.0 Hz. En este registro no existen eventos que hayan provocado valores de ángulo mayores a los 90°.

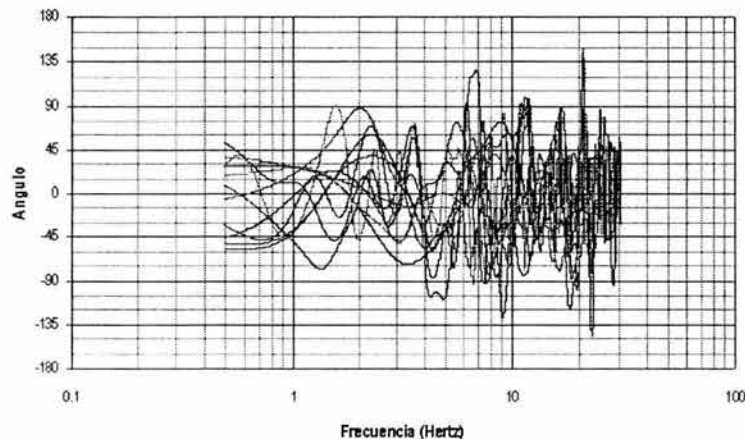


Figura 4.56- Ángulo de fase del inclinómetro P a la corona testigo.

Para el registro sísmico de ángulo de fase producto de los equipos P y T, se detectó que la mayoría de los eventos concentraron sus cambios de signo para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, únicamente los dos sismos de mayor magnitud lo hicieron para valores superiores. Respecto a los valores de ángulo manifestados en el intervalo de frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, se observó que en general fueron menores a los 60°. Esta vez fueron los sismos 141, 145, 151, 153 y 155 los que provocaron ángulos de fase mayores a los 90°, para diferentes frecuencias.

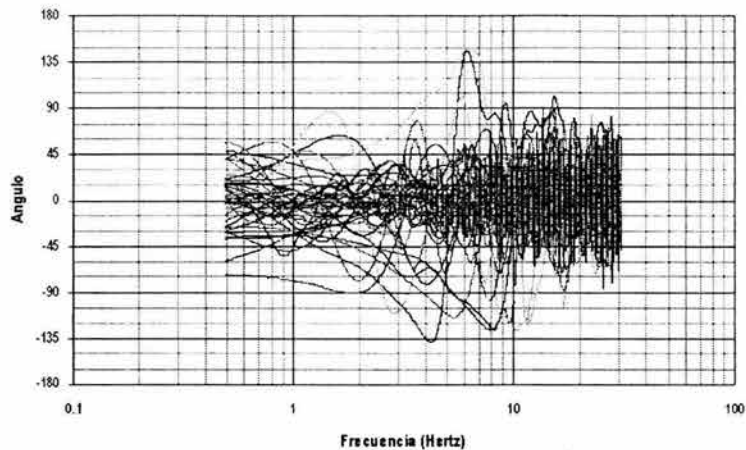


Figura 4.57 - Ángulo de fase de la corona testigo a la corona centro.

Para el registro sísmico representado por la figura 4.57 y elaborado por los equipos de monitoreo T y C, instalados ambos al nivel de la corona, se detectó que los sismos de mayor magnitud concentraron sus cambios de signo para frecuencias mayores a los 3.0 Hz, mientras que los sismos de menor magnitud lo hicieron en general para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, intervalo para el cual los valores de ángulo se mantuvieron mayoritariamente por debajo de los 45°. Esta vez se manifestaron ángulos mayores a los 90° como consecuencia de los sismos 98, 106, 108, 110, 117, 119, 127 y 129, para frecuencias mayores a los 2.0 Hz.

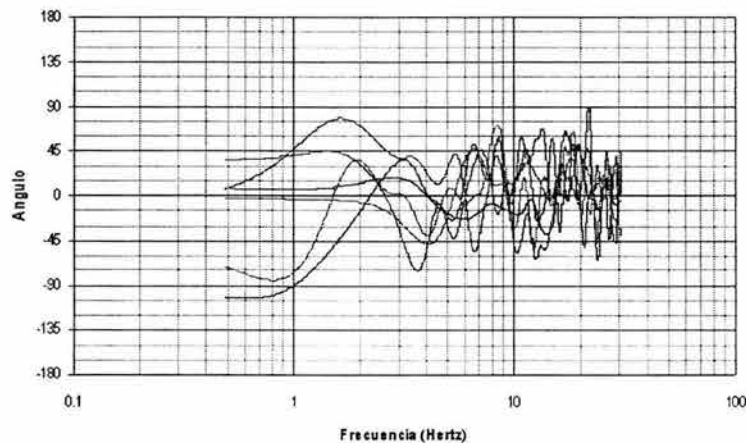


Figura 4.58 - Ángulo de fase de la corona testigo hacia aguas abajo en la corona.

Esta figura es el resultado del registro sísmico de los eventos captados del acelerógrafo T al G, ambos en la corona de la cortina. Como se puede ver, la mayoría de los eventos provocaron valores de ángulo menores a los 60° dentro del intervalo de frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz. Así mismo los sismos de mayor magnitud incluidos en este registro presentaron concentraciones con cambios de signo para frecuencias menores a los 2.0 Hz, mientras que los sismos de menor magnitud lo hicieron para valores mayores a los 3.0 Hz. En esta ocasión sólo el sismo 89, provocó para una frecuencia mayor a los 20.0 Hz, un defasamiento mayor a los 90°.

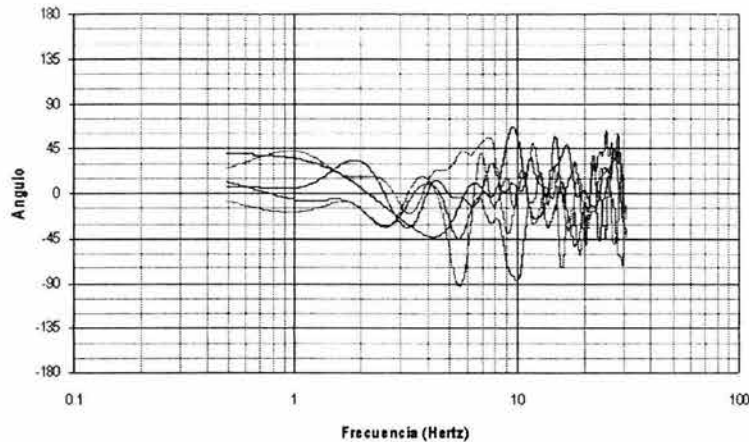


Figura 4.59 - Ángulo de fase de la corona testigo hacia aguas arriba en la corona.

Mediante esta figura, que representa al registro sísmico elaborado por los instrumentos de monitoreo T y H, instalados ambos al nivel de la corona, se detectó que los eventos de mayor magnitud concentraron sus cambios de signo para frecuencias mayores a los 2.0 Hz, no así los de menor magnitud pues estos lo hicieron para valores entre 1.0 y 2.0 Hz, intervalo en el que los valores de ángulo fueron menores a los 45°. En esta ocasión sólo el sismo 110 provocó un ángulo mayor a los 90° para una frecuencia próxima a los 5.0 Hz.

Por medio de las figuras presentadas para evaluar respecto al ángulo de fase el comportamiento dinámico de la presa José María Morelos, se pudo determinar para la zona superior de la estructura lo siguiente: para las frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, los valores de ángulo de fase son en general menores a los 60°, una vez excedida esta frecuencia y en relación a la magnitud del sismo, los valores de ángulo de fase van incrementando, de tal forma que para esta zona de la cortina los ángulos mayores a los 90° se desarrollan principalmente para frecuencias mayores a los 4.0 Hz. También se detectó que los sismos de mayor magnitud presentan sus cambios de signo en frecuencias mayores a los 2.0 Hz mientras que los eventos de menor magnitud lo hacen para valores comprendidos entre 1.0 y 2.0 Hz.

Respecto a la zona inferior se observó un comportamiento similar ya que en esta región los valores de ángulo de fase, dentro del intervalo de frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, fueron mayoritariamente menores a los 75° y de igual forma cuando se excede esta frecuencia dichos valores aumentan en relación a la magnitud del evento. También en este caso los sismos de menor magnitud concentraron mayoritariamente sus cambios de signo en frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz y los de mayor magnitud lo hicieron para valores mayores a los 2.0 Hz, además se encontró que los valores de ángulo mayores a los 90°, se desarrollan en general para frecuencias mayores a los 7.0 Hz.

De los registros que relacionan directamente a la base con la corona de la estructura se observó que la mayoría de los fenómenos provocaron para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz valores de ángulo inferiores a los 60°, dichos valores aumentan cuando se excede una frecuencia de 2.0 Hz y son mayores en relación con la magnitud del evento. En este caso los valores de ángulo mayores a los 90° se presentaron en general para frecuencias superiores a los 4.0 Hz. También se detectó que los sismos de mayor magnitud manifiestan sus cambios de signo para valores mayores a los 3.0 Hz, no así los sismos de menor magnitud, que lo hacen para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz.



Se observa para los tres casos mucha similitud en el comportamiento sísmico interpretado, por lo que de manera general se puede decir que en la estructura los eventos de mayor magnitud presentan concentraciones con cambios de signo para frecuencias mayores a los 2.0 Hz, mientras que los sismos de menor magnitud lo hacen para un intervalo de frecuencias que va desde 1.0 hasta 2.0 Hz, así mismo, los mayores ángulos de fase se relacionan con los sismos de mayor magnitud y se manifiestan principalmente cuando las frecuencias son mayores a 2.0 Hz, de hecho los valores superiores a los 90° se presentan en general con frecuencias mayores a los 4.0 Hz, en cambio para las frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz los valores de ángulo son generalmente menores a los 60°.

En seguida se presenta un resumen de los sismos que fueron detectados mediante los registros sísmicos presentados de la figura 4.31 a la 4.59, como aquellos que generaron alteraciones en la estructura.

Sismo	Zonas de afectación	Sismo	Zonas de afectación	Sismo	Zonas de afectación
17	Base y corona	130	Base y corona	166	Base y corona
89	Base y corona	134	Base y corona	167	Base y corona
98	Corona	136	Base y altura media	172	Base
106	Altura media y corona	141	Base, altura media y corona	182	Base y corona
108	Altura media y corona	145	Base, altura media y corona	183	Base y corona
110	Altura media y corona	151	Base y altura media	192	Base y corona
111	Altura media y corona	153	Base y corona	202	Base y corona
117	Corona	155	Base y corona	203	Base y corona
119	Corona	156	Base, altura media y corona	205	Base y corona
124	Altura media y corona	158	Base	214	Base y corona
127	Corona	162	Base y corona	220	Base y corona
129	Corona	165	Base y corona		

Tabla 4.3 – Sismos relevantes detectados en los registros de ángulo de fase.

En relación a las márgenes de la presa se encontró mucha similitud con el comportamiento sísmico del cuerpo de la cortina, la variante más destacada se observó para los valores de ángulo de fase dentro del intervalo de frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, que en general para estas regiones, fueron menores a los 45°. Las demás características fueron muy similares a las encontradas en el cuerpo de la cortina, por ejemplo el incremento en los valores de ángulo también se presenta para frecuencias mayores a los 2.0 Hz y se vincula con la magnitud del sismo y además los sismos de mayor magnitud presentaron concentraciones con cambios de signo para frecuencias mayores a los 3.0 Hz mientras que los de menor magnitud lo hicieron para valores inferiores a los 2.0 Hz.

De la tabla 4.3 se observa que la zona mayormente afectada por los eventos sísmicos considerados en este análisis dinámico, fue la corona de la estructura, ya que un total de 31 sismos provocaron defasamientos de movimiento considerables entre la corona y alguna otra región de la cortina, inmediatamente a esta región, fue la base la que resulto mas afectada, pues 25 fenómenos sísmicos provocaron el mismo efecto mencionado.



4.3 - FUNCIONES 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, entonces, para dicha frecuencia no existe una correlación. Cuando $\gamma_{xy}^2(f) \neq 0$ para todas las frecuencias, entonces $x(t)$ y $y(t)$ son estadísticamente independientes. Cuando $\gamma_{xy}^2(f) = 1$ para toda frecuencia, entonces $x(t)$ y $y(t)$ son completamente coherentes.

A continuación se muestran las figuras que representan a los registros sísmicos de coherencia, elaborados por los diferentes instrumentos de monitoreo instalados en el cuerpo de la cortina, en esta ocasión lo esencial es identificar los valores de coherencia próximos a la unidad dentro del intervalo comprendido entre 1 y 2 Hz, detectando con esto a los sismos que para frecuencias cercanas a la característica (en la componente longitudinal de la estructura), provocaron movimientos con similitud tanto en la entrada como en la salida, es decir, entre los equipos que elaboran el registro sísmico.

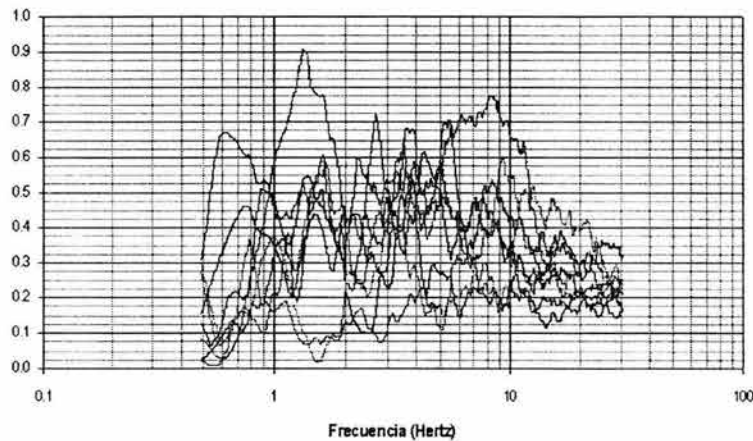


Figura 4.60 - Coherencia del deck 1 a la corona centro.

Para comenzar el estudio del comportamiento sísmico del cuerpo de la cortina de la presa José María Morelos, respecto a la variable de coherencia, se presenta la figura 4.60 que corresponde al registro sísmico elaborado por los instrumentos 1 y C localizados en la elevación 30 y en la corona de la cortina respectivamente, la imagen exhibe que los sismos captados en general desarrollaron un comportamiento estadísticamente independiente, sólo el sismo 110 presentó una coherencia próxima a la unidad para una frecuencia cercana a 1.4 Hz.

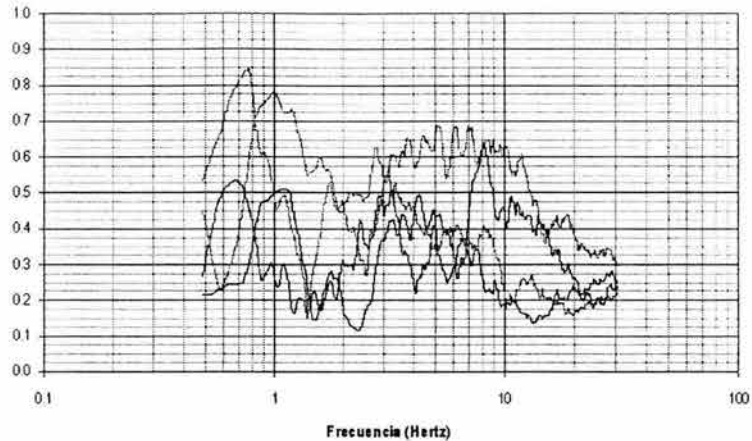


Figura 4.61 - Coherencia del deck 1 hacia aguas abajo en la corona.

En esta imagen se observa que la coherencia manifestada por la mayoría de los eventos sísmicos, captados del acelerógrafo 1 al G, se desarrolló de manera estadísticamente independiente, sólo destaca un valor de coherencia próximo a 0.85 para una frecuencia de 0.8 Hz, aproximadamente, que fue provocado por el sismo 98.

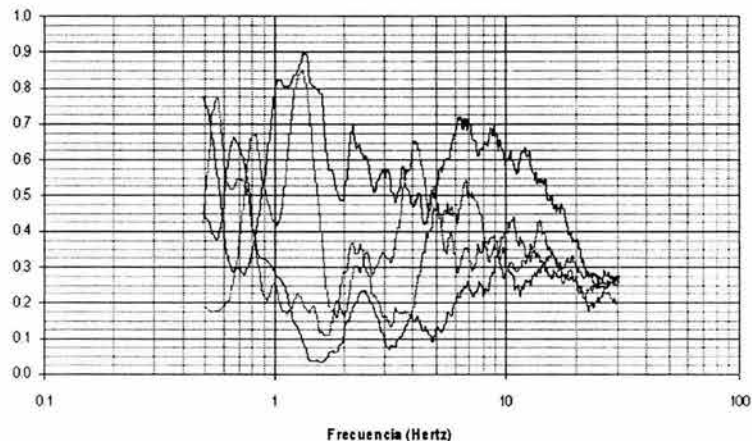


Figura 4.62 - Coherencia del deck 1 hacia aguas arriba en la corona.

Esta figura corresponde al registro sísmico de coherencia elaborado por los equipos de medición 1 y H, en ella se observa que en general los sismos siguieron un comportamiento estadísticamente independiente, con valores de coherencia diferentes de cero pero lejanos a la unidad, únicamente los sismos 108 y 110, descritos en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, generaron coherencias mayores a 0.8 dentro del intervalo de frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, excluyéndose por tanto de dicho comportamiento.

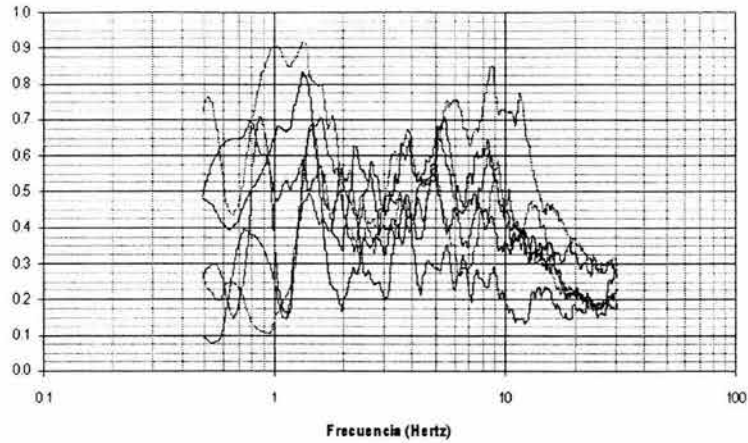


Figura 4.63 - Coherencia del deck 1 a la corona testigo.

La figura 4.63 representa al registro sísmico de coherencia elaborado por los acelerógrafos 1 y T, instalados en la elevación 35 y en la corona de la cortina respectivamente. Se observa que los fenómenos sísmicos captados presentaron mayoritariamente un comportamiento común con valores de coherencia alejados de la unidad; sin embargo, nuevamente los eventos 108 y 110 tuvieron aproximaciones considerables a dicho valor, dentro del intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.0 Hz, por lo que se excluyen del comportamiento citado. En la figura se observa otra frecuencia de excitación, ya que el sismo 110 para un valor próximo a los 9.0 Hz provocó una coherencia mayor a 0.8.

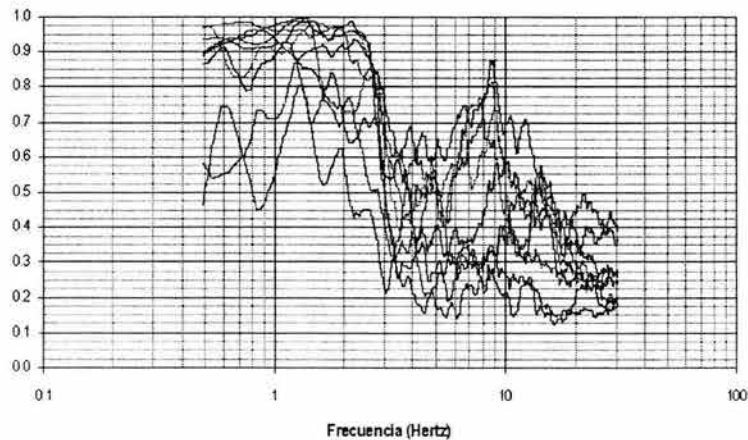


Figura 4.64 - Coherencia del deck 2 al deck 1.

Para el registro sísmico de coherencia elaborado por los instrumentos de monitoreo 2 y 1, instalados en el núcleo impermeable de la estructura en las elevaciones 49.5 y 35 respectivamente, se observó que la mayoría de los sismos provocaron valores de coherencia cercanos a la unidad en el intervalo de frecuencias comprendido entre 0.5 y 3.0 Hz, de tal forma que en este caso el comportamiento general fue de manera estadísticamente dependiente, tales sismos se definen en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II por medio de los números 98, 106, 108, 109, 110, 111, 112 y 133. Destaca en la figura la presencia de otra frecuencia de excitación ya que para 9.0 Hz aproximadamente los sismos 108 y 110 ocasionaron coherencias mayores a 0.8.



Capítulo IV – Análisis dinámico

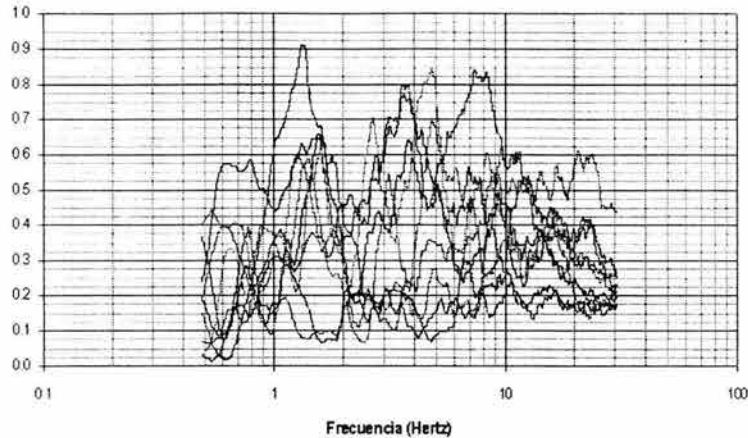


Figura 4.65 - Coherencia del deck 2 a la corona centro.

Para el registro sísmico de coherencia producido por los equipos de monitoreo 2 y C, instalados en la elevación 49.5 y en la corona de la cortina respectivamente, se determinó que el comportamiento de los fenómenos sísmicos fue en general estadísticamente independiente, únicamente el sismo 110 adquirió durante su ocurrencia un valor de coherencia cercano a la unidad para una frecuencia próxima a 1.4 Hz, quedando fuera del comportamiento antes mencionado. Se observa la presencia de otras frecuencias de excitación ya que el sismo 110 para valores próximos de 5.0 y 7.0 Hz provocó coherencias mayores a 0.8.

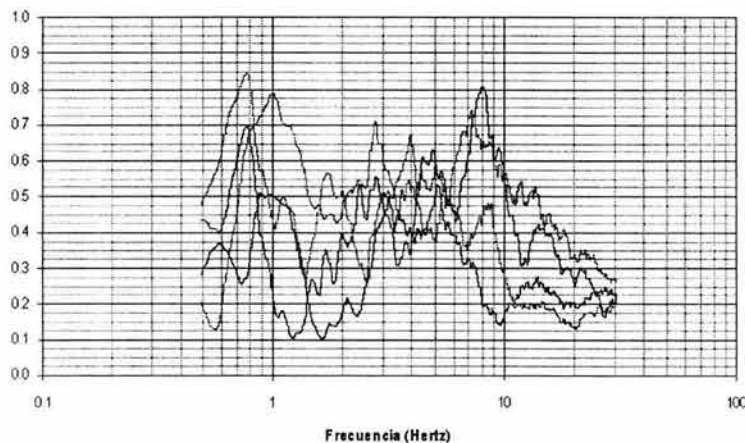


Figura 4.66 - Coherencia del deck 2 hacia aguas abajo en la corona.

La figura 4.66 corresponde al registro sísmico de coherencia elaborado por los instrumentos de monitoreo 2 y G, ubicados en la elevación 49.5 y al nivel de la corona respectivamente. Se observa en esta ocasión que la mayoría de los eventos captados siguieron un comportamiento estadísticamente independiente, sólo los eventos 98 y 108 provocaron coherencias próximas a la unidad para frecuencias de excitación cercanas a 0.8 y 8.0 Hz.



Capítulo IV – Análisis dinámico

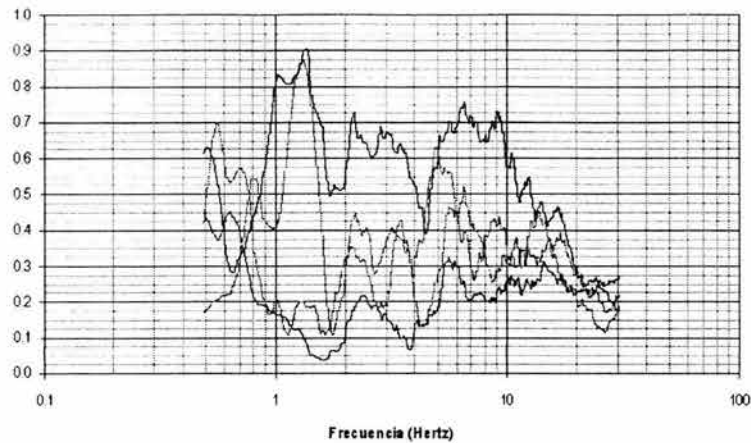


Figura 4.67 - Coherencia del deck 2 hacia aguas arriba en la corona.

Para el registro sísmico de coherencia elaborado por los acelerógrafos 2 y H, que se localizan en la elevación 49.5 y en la corona de la cortina respectivamente, se observó que el comportamiento de los sismos fue en general estadísticamente independiente con valores de coherencia diferentes de cero pero lejanos a la unidad. En esta ocasión los sismos 108 y 110 provocaron coherencias mayores a 0.8 en frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, por lo que quedan excluidos del comportamiento citado.

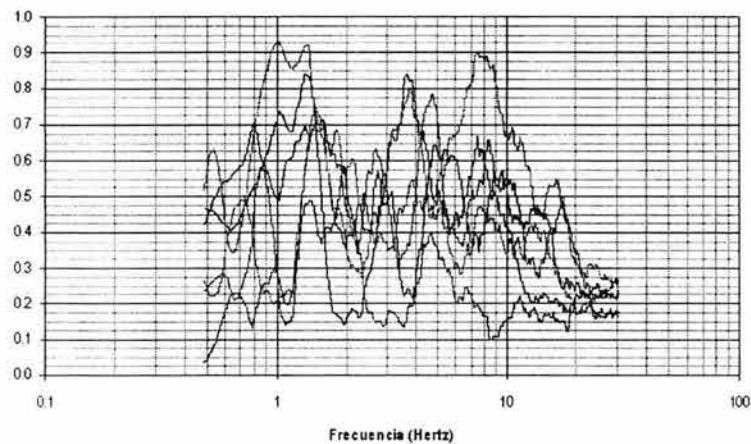


Figura 4.68 - Coherencia del deck 2 a la corona testigo.

Mediante la figura 4.68, que representa al registro sísmico de coherencia para los sismos captados del equipo de medición 2 al T, se puede observar que los eventos manifestaron mayoritariamente un comportamiento estadísticamente independiente, a excepción de los sismos 108 y 110 que para el intervalo de frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, provocaron valores de coherencia próximos a la unidad. También se observan otras frecuencias de excitación ya que para 4.0 y 7.0 Hz, los sismos 98 y 110 originaron coherencias mayores a 0.8.



Capítulo IV – Análisis dinámico

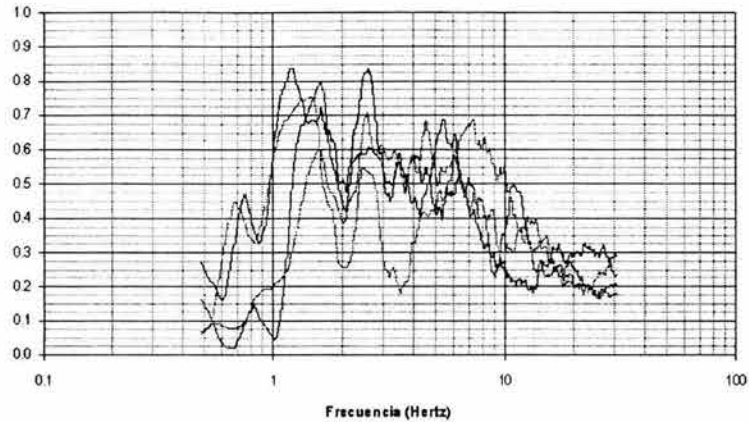


Figura 4.69 - Coherencia del inclinómetro 6 a la corona centro.

Para el registro sísmico de coherencia 6 – C, representado por la figura 4.69 y cuyos instrumentos se localizan en la elevación 30 y en la corona de la cortina respectivamente, se puede concluir que en general los eventos desarrollaron un comportamiento estadísticamente independiente, sólo el sismo 123 será excluido de este comportamiento por haber provocado en frecuencias próximas a 1.3 y 2.7 Hz, coherencias mayores a 0.8.

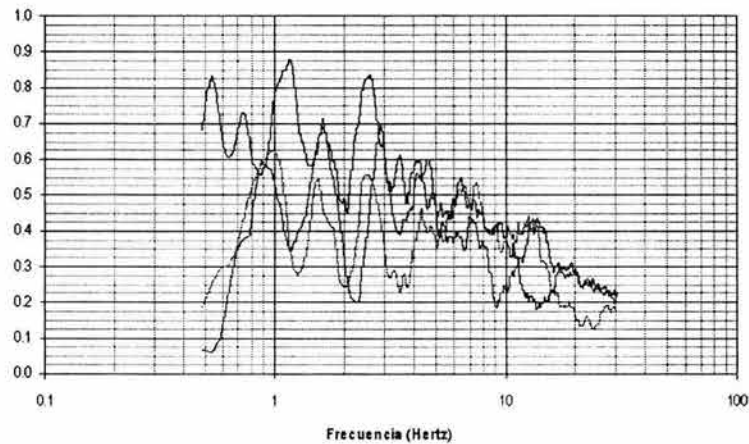


Figura 4.70 - Coherencia del inclinómetro 6 a la corona testigo.

Para el registro sísmico de coherencia 6 – T se observa que dos de los tres sismos captados desarrollaron durante su ocurrencia un comportamiento estadísticamente independiente, únicamente el sismo 123 provocó para frecuencias de 1.3 y 2.7 Hz, valores de coherencia próximos a la unidad.



Capítulo IV – Análisis dinámico

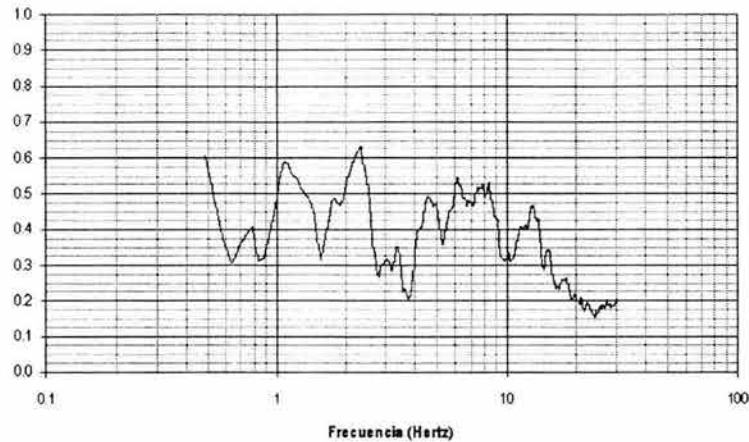


Figura 4.71 - Coherencia de la base centro al inclinómetro 6.

Mediante la figura 4.71 se observa que el único sismo captado por los acelerógrafos B y 6 mantuvo durante su desarrollo valores de coherencia alejados de la unidad.

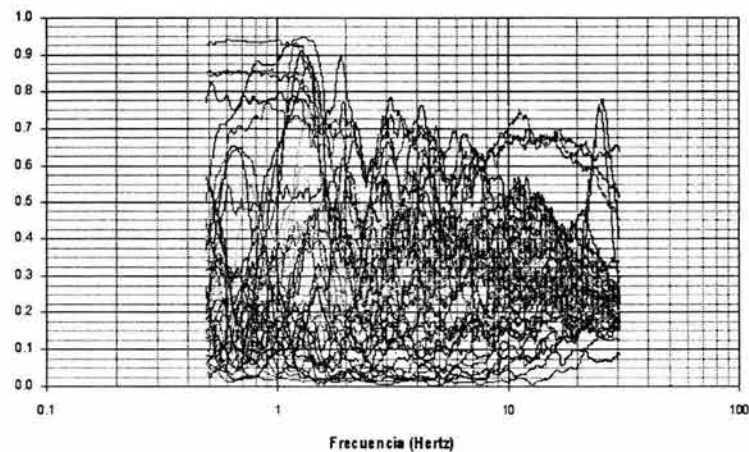


Figura 4.72 - Coherencia de la base centro a la corona centro.

Este registro sísmico de coherencia es el resultado del monitoreo realizado por los equipos B y C. De la figura se observa que los fenómenos sísmicos asumieron de manera general un comportamiento estadísticamente independiente a excepción de los eventos 8, 9, 130, 158, 165, 182 y 192 que presentaron para frecuencias comprendidas entre 0.5 y 2.0 Hz coherencias próximas a la unidad, además los sismos 7 y 12 que para una frecuencia próxima a los 25.0 Hz se alejaron del comportamiento común al alcanzar valores de coherencia mayores respecto al conjunto.



Capítulo IV – Análisis dinámico

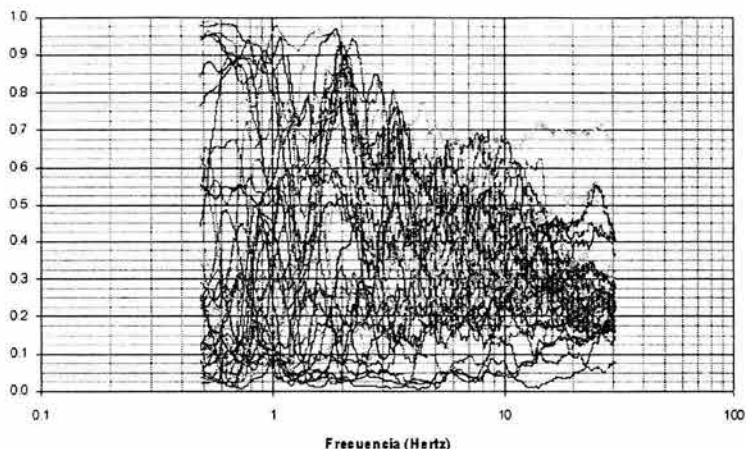


Figura 4.73 - Coherencia en la base de la cortina.

La figura 4.73 corresponde al registro sísmico de coherencia elaborado por los instrumentos de monitoreo F y B, localizados ambos en la elevación 13.5 de la cortina. Se observa en la figura que la mayoría de los sismos desarrollaron un comportamiento estadísticamente independiente, por los valores de coherencia alejados de la unidad, la excepción fueron los eventos 141, 145, 151, 152, 155, 158, 162, 165, 170, 172 y 188, que en frecuencias comprendidas de 0.5 a 2.0 Hz provocaron coherencias mayores a 0.8. Destaca la presencia de otra frecuencia de excitación, próxima a 2.8 Hz, con la cual los sismos 141 y 155 originaron coherencias superiores a 0.8.

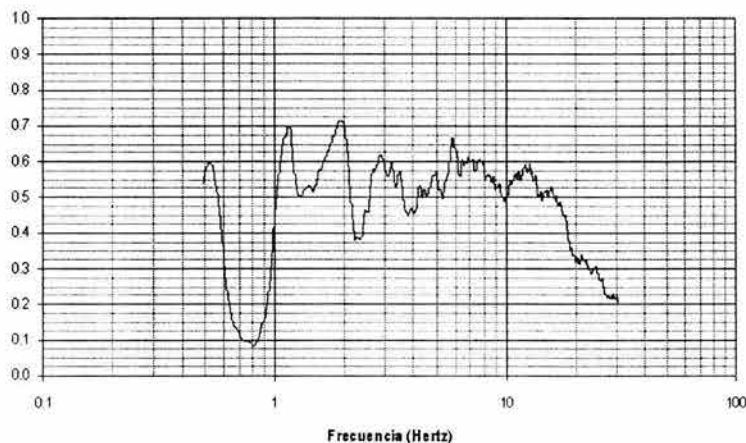


Figura 4.74 - Coherencia de la base centro hacia aguas abajo en la corona.

La gráfica del registro sísmico de coherencia B – G, permite observar que el único sismo captado tuvo un desarrollo con valores de coherencia alejados de la unidad.



Capítulo IV – Análisis dinámico

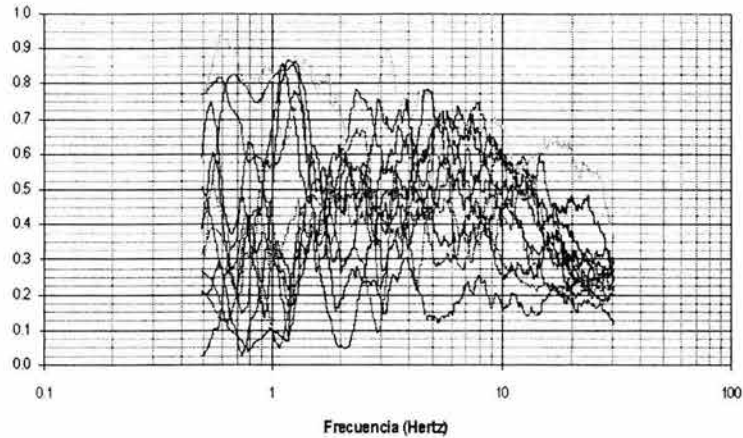


Figura 4.75 - Coherencia de la base centro al inclinómetro P.

La figura 4.75 corresponde al registro sísmico elaborado por los acelerógrafos B y P. De acuerdo con la imagen, los eventos captados adquirieron mayoritariamente un comportamiento estadísticamente independiente durante su ocurrencia, únicamente los eventos 136, 141, 144 y 153, definidos en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, causaron para frecuencias comprendidas entre 0.6 y 2.0 Hz, coherencias próximas a la unidad. Se observa otra frecuencia de excitación, ya que para un valor aproximado de 3.1 Hz, el sismo 141 provocó una coherencia mayor a 0.8.

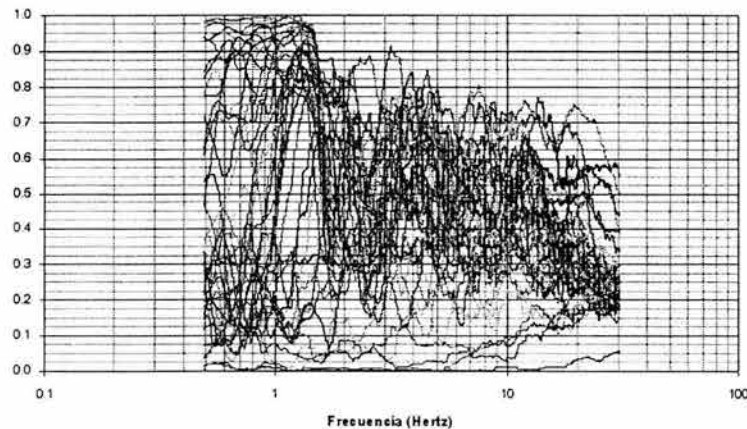


Figura 4.76 - Coherencia de la base centro a la corona testigo.

Para el registro sísmico de coherencia B - T, representado por la figura 4.76, cuyos equipos se localizan en la elevación 13.5 y en la corona de la cortina respectivamente, se observó que los sismos en general desarrollaron un comportamiento estadísticamente independiente pues conservaron valores de coherencia alejados de la unidad; sin embargo, en esta ocasión se detectaron bastantes sismos que se excluyen de tal comportamiento, ya que para frecuencias comprendidas entre 0.5 y 2.3 Hz adquirieron coherencias próximas a la unidad, estos sismos están descritos en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II por los números 130, 141, 145, 151, 153, 155, 156, 162, 163, 164, 165, 182, 183, 184, 201, 202 y 203. Destacan otras frecuencias de excitación, con valores de 3.1, 4.0 y 4.5 Hz, en las cuales se observan coherencias mayores a 0.8.



Capítulo IV – Análisis dinámico

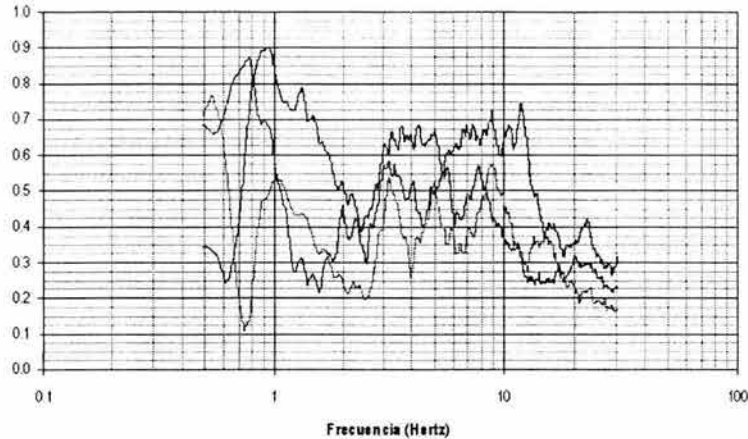


Figura 4.77 - Coherencia de la base al deck 1.

La figura 4.77 corresponde al registro sísmico de coherencia elaborado por los equipos F y 1, localizados en las elevaciones 13.5 y 35 respectivamente, se observa que sólo uno de los tres eventos captados provocó valores de coherencia alejados a la unidad, por lo tanto los sismos 98 y 110 causaron coherencias próximas a este valor, en frecuencias cercanas a 0.8 y 0.9 Hz respectivamente.

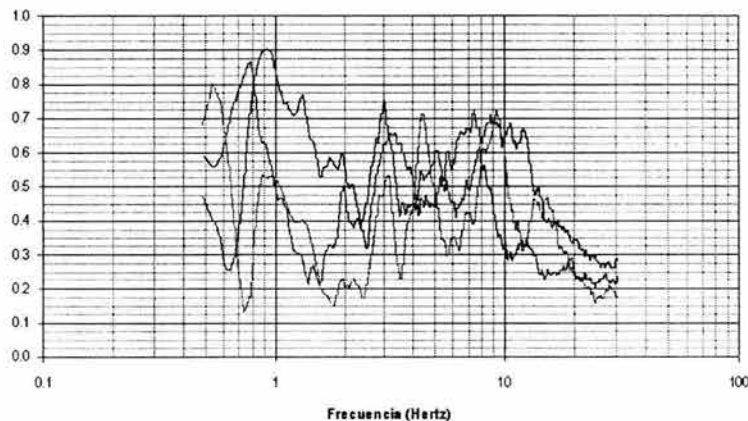


Figura 4.78 - Coherencia de la base al deck 2.

La figura arriba expuesta corresponde al registro sísmico de coherencia elaborado por los instrumentos de monitoreo F y 2, en esta ocasión sólo fueron captados tres sismos por dichos equipos, de los cuales dos desarrollaron un comportamiento estadísticamente dependiente, con coherencias próximas a la unidad para frecuencias cercanas a 0.8 y 0.9 Hz, tales sismos están descritos en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II mediante los números 98 y 110.

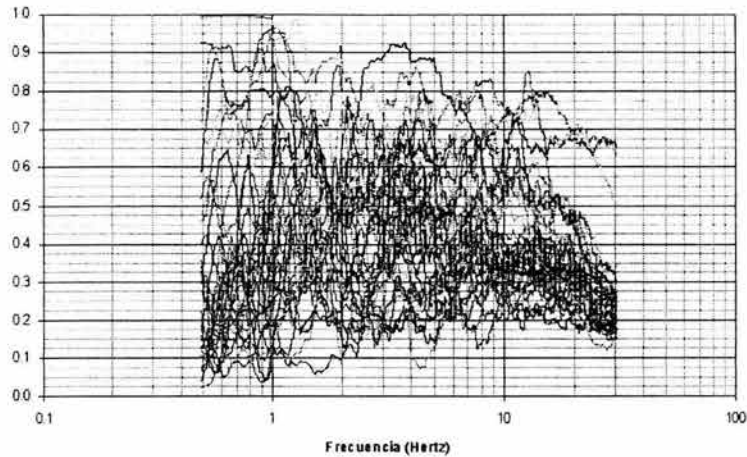


Figura 4.79 - Coherencia de la base a la corona centro.

El registro sísmico F – C, ilustrado por la figura 4.79, involucra instrumentos que se instalaron en la elevación 13.5 y en la corona de la cortina respectivamente, la imagen muestra que la mayoría de los sismos captados adquirieron durante su desarrollo un comportamiento estadísticamente independiente, a excepción de los sismos 158, 165, 182, 183, 192, 202 y 214 que provocaron para frecuencias comprendidas entre 0.5 y 2.0 Hz, valores de coherencia próximos a la unidad. Se observan además, otras frecuencias de excitación ya que para valores de 2.8, 3.5, 4.0, 8.0 y 12.0 Hz, aproximadamente, se alcanzaron coherencias mayores a 0.8.

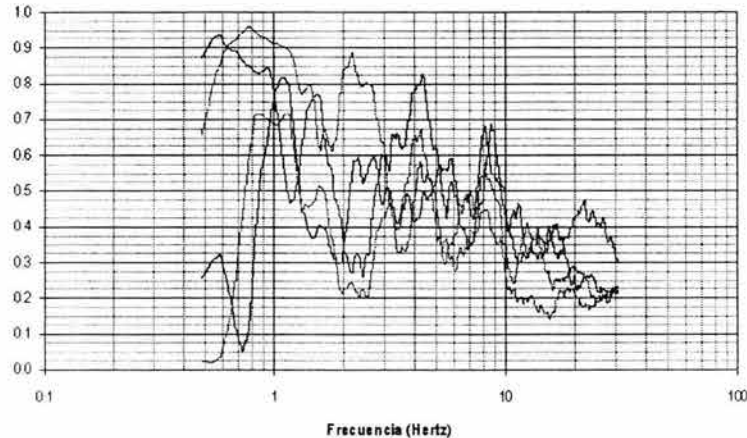


Figura 4.80 - Coherencia de la base hacia aguas abajo en la corona.

Para el registro sísmico de coherencia F – G, cuyos sismos fueron captados de la elevación 13.5 a la corona de la cortina, se observa que dos de los cuatro eventos desarrollaron un comportamiento estadísticamente independiente, con valores de coherencia alejados de la unidad, contrariamente los sismos 89 y 98 adquirieron para frecuencias comprendidas entre 0.5 y 1.3 Hz, coherencias próximas al valor citado, por lo que quedan excluidos de tal comportamiento. Se distinguen en la figura otros dos puntos de coherencia mayores a 0.8 correspondientes a frecuencias de 2.1 y 4.2 Hz aproximadamente.



Capítulo IV – Análisis dinámico

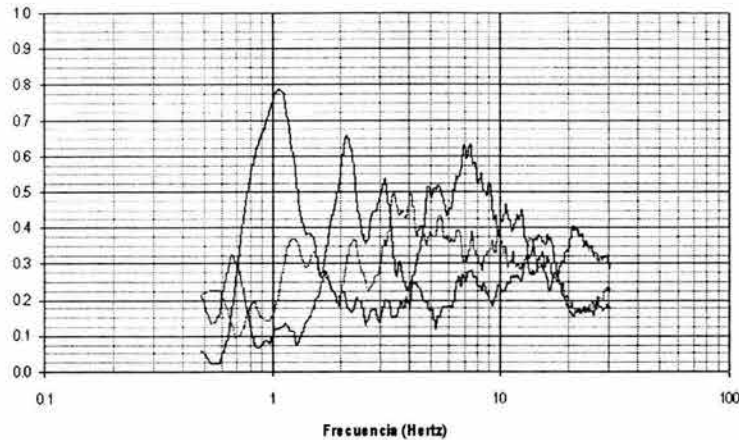


Figura 4.81 - Coherencia de la base hacia aguas arriba en la corona.

Del análisis de esta figura, que representa al registro sísmico de coherencia F – H, cuyos eventos fueron registrados de la base a la corona de la cortina, se determinó que todos los sismos desarrollaron durante su ocurrencia un comportamiento estadísticamente independiente.

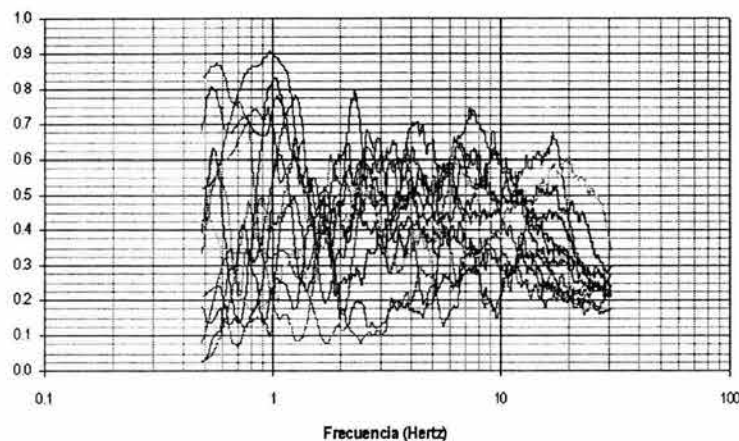


Figura 4.82 - Coherencia de la base al inclinómetro P.

La figura 4.82 ilustra al registro sísmico de coherencia generado por los instrumentos F y P, de la imagen se observa que la mayoría de los eventos captados siguieron un comportamiento estadísticamente independiente con valores de coherencia lejanos a la unidad. En este caso sólo los sismos 141, 145 y 155 provocaron coherencias mayores a 0.8 para frecuencias comprendidas entre 0.5 y 1.3 Hz, por lo que se excluyen del comportamiento citado.



Capítulo IV – Análisis dinámico

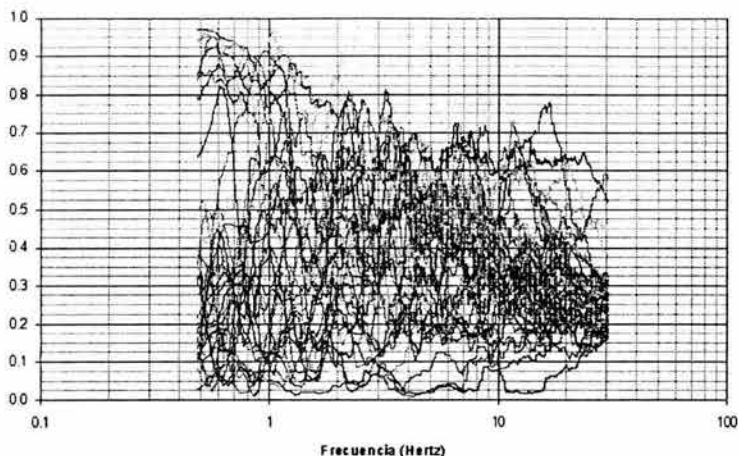


Figura 4.83 - Coherencia de la base a la corona testigo.

La figura 4.83 cuenta con bastante información sísmica, hecho que permite realizar un mejor análisis del comportamiento de los eventos captados del instrumento F al T. Se observa que los sismos desarrollaron en general un comportamiento estadísticamente independiente durante su ocurrencia, sólo los eventos 98, 110, 141, 145, 155, 162, 165 y 167, adquirieron coherencias cercanas a la unidad para frecuencias comprendidas entre 0.5 y 2.1 Hz, por lo que quedan excluidos del comportamiento mencionado. Se observa además otra frecuencia de excitación ya que para 3.2 Hz aproximadamente se desarrolló una coherencia mayor a 0.8.

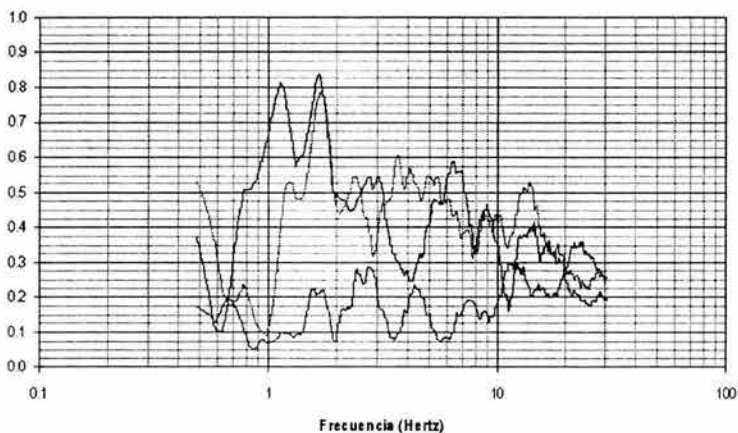


Figura 4.84 - Coherencia de aguas abajo hacia aguas arriba en la corona.

La figura 4.84 ilustra al registro sísmico de coherencia producto de los instrumentos de monitoreo G y H, instalados ambos en la corona de la cortina. La imagen indica que de manera general los sismos desarrollaron un comportamiento estadísticamente independiente a excepción del sismo 110 que para el intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.0 Hz provocó valores de coherencia mayores a 0.8.

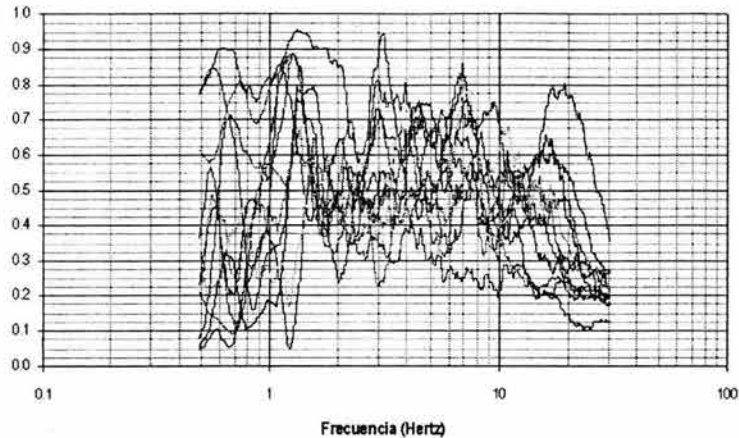


Figura 4.85 - Coherencia del inclinómetro P a la corona testigo.

En este caso, el registro sísmico ilustrado por la figura 4.85, fue elaborado por los equipos de monitoreo P y T, del análisis hecho se determinó que en general los sismos captados desarrollaron un comportamiento estadísticamente independiente, únicamente los sismos 145, 153 y 155 presentaron valores de coherencia próximos a la unidad para frecuencias comprendidas en el intervalo de 1.0 a 2.0 Hz. Existen en la figura otros dos picos de coherencia mayores a 0.8, manifestados en frecuencias próximas a 3.0 y 7.0 Hz.

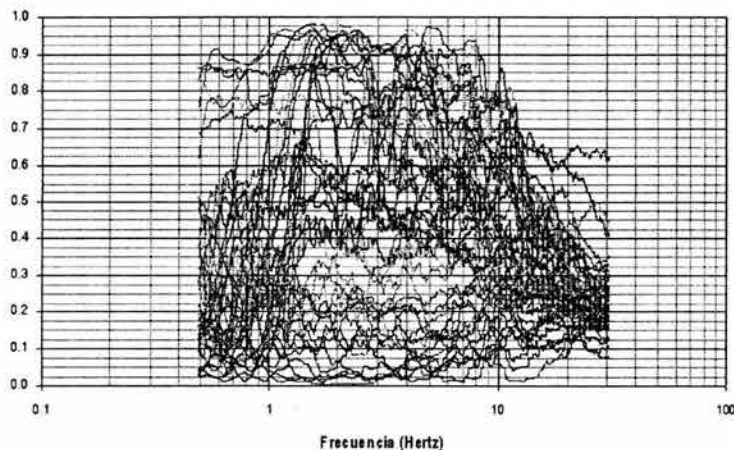


Figura 4.86 - Coherencia de la corona testigo a la corona centro.

La figura 4.86 representa al registro sísmico de coherencia T – C, cuyos acelerógrafos están ubicados en la corona de la cortina, se observa que la cantidad de sismos captados por estos instrumentos fue importante y que la mayoría desarrolló durante su ocurrencia un comportamiento estadísticamente independiente con valores de coherencia alejados de la unidad; sin embargo, en esta ocasión bastantes fueron los sismos excluidos de tal comportamiento por provocar coherencias mayores a 0.8 para frecuencias comprendidas desde 0.5 hasta 10.0 Hz, y sobretodo para una frecuencia característica de 1.5 Hz, aproximadamente, tales sismos están detallados en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II y están referidos por los números 98, 106, 108, 110, 111, 113, 117, 119, 123, 127, 128, 129 y 130.



Capítulo IV – Análisis dinámico

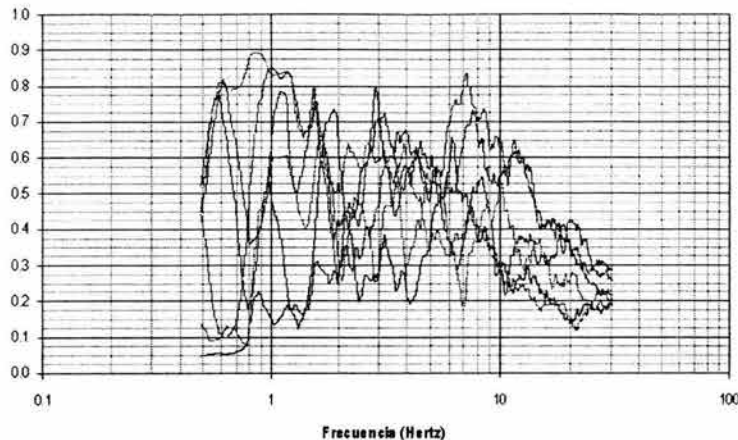


Figura 4.87 - Coherencia de la corona testigo hacia aguas abajo en la corona.

Como puede observarse, el registro sísmico de coherencia T – G, cuyos instrumentos se localizan en la corona de la cortina, exhibe seis sismos captados, de los cuales, cuatro desarrollaron durante su duración un comportamiento estadísticamente independiente, de tal forma que los sismos 98 y 110 se excluyen de este comportamiento por provocar para frecuencias comprendidas entre 0.5 y 1.3 Hz, coherencias próximas a la unidad. En el registro se observa la presencia de otra frecuencia de excitación, ya que para 7.0 Hz aproximadamente, se alcanzó un valor de coherencia mayor a 0.8.

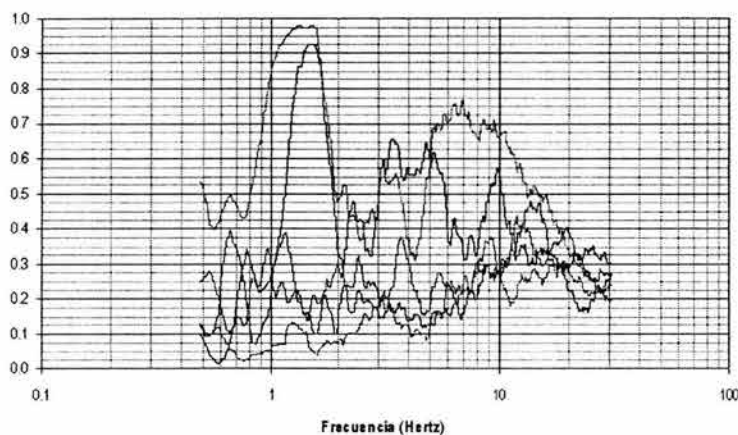


Figura 4.88 - Coherencia de la corona testigo hacia aguas arriba en la corona.

Esta imagen corresponde al registro sísmico de coherencia elaborado por los instrumentos de monitoreo T y H, y exhibe que la mayoría de los eventos percibidos mantuvo coherencias lejanas a la unidad, a excepción de los sismos 108 y 110 que para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz provocaron valores de coherencia mayores a 0.8.



De acuerdo a la definición presentada para la función de coherencia, en este análisis la mayoría de los casos presentaron correlaciones parciales, es decir, comportamientos estadísticamente independientes, con valores diferentes de cero pero alejados de la unidad. Los valores de coherencia más próximos a 1, se detectaron en los registros sísmicos 2 – 1, B – F, B – T, F – C y T – C del cuerpo de la cortina y en los registros I – B, I – T, D – B, D – I y D – T para las márgenes de la misma, sin embargo, como el objetivo de este análisis es evaluar la dependencia de los movimientos para un mismo tiempo en dos regiones distintas de la cortina, se consideró que un valor de coherencia mayor a 0.8 representa una correlación de movimiento importante.

Del análisis hecho a través de las figuras 4.60 a la 4.88 se obtuvieron los siguientes resultados, de manera general para toda la estructura se observaron valores de coherencia menores a 0.8, con algunos valores aislados próximos a la unidad, provocados en general por sismos de magnitudes mayores a los 5 grados Richter. Se detectó también, que en general el comportamiento estadísticamente dependiente, con valores de coherencia mayores a 0.8, se desarrolla dentro del intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.0 Hz, y de manera más precisa para una frecuencia próxima a 1.4 Hz. Así mismo, fue notorio que los valores característicos del comportamiento estadísticamente independiente se presentan para frecuencias mayores a los 2.0 Hz, demostrando que la relación de movimientos, entre los puntos de comparación, para estas frecuencias es mucho menor que para valores de 1.0 a 2.0 Hz. También se observó en muchos de los registros elaborados por los acelerógrafos del cuerpo de la cortina, el desarrollo de coherencias mayores a 0.8 para frecuencias próximas a los 3.0 Hz.

Zona Inferior		Zona Superior		Base - Corona		Margen Derecha		Margen Izquierda	
☞	▲	☞	▲	☞	▲	☞	▲	☞	▲
B-6	-	1-C	1.4	B-C	0.5-2.0	D-6	-	I-1	0.6-1.2
B-P	0.6-2.0	1-G	0.8	B-G	-	D-B	0.5-2.0	I-2	0.6-1.2
F-P	0.5-1.3	1-H	1.0-2.0	B-T	0.5-2.0	D-C	0.5-2.0	I-6	1.0-1.4
F-1	-	1-T	1.0-2.0	F-2	-	D-F	1.0-2.0	I-B	0.5-2.0
B-F	0.5-2.0	2-1	0.5-2.0	F-C	0.5-2.0	D-G	-	I-C	0.5-1.5
		2-C	1.4	F-G	0.5-1.3	D-I	0.8-2.0	I-F	0.5-2.0
		2-G	-	F-H	-	D-P	1.3-2.0	I-G	0.8
		2-H	1.4	F-T	0.5-2.0	D-T	1.3	I-H	-
		2-T	1.4			E-B	0.8-1.5	I-P	0.5-2.0
		6-C	1.3			E-C	0.9	I-T	0.5-2.0
		6-T	1.3			E-D	0.9		
		P-T	0.5-2.0			E-F	0.8-2.0		
		G-H	1.0-2.0			E-G	0.8-1.5		
		T-C	0.5-2.0			E-H	1.5		
		T-G	0.5-1.3			E-I	0.8-1.3		
		T-H	1.0-2.0			E-P	0.5-2.0		
						E-T	0.5-2.0		

Tabla 4.4 – Frecuencias menores a 2 Hz donde se desarrollan coherencias próximas a la unidad.

- ☞ Registros
▲ Frecuencias donde se desarrollan las coherencias mayores a 0.8

Como se puede observar en la tabla 2.4, los registros que involucran las márgenes de la estructura mostraron coherencias mayores a 0.8 para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz mayoritariamente, mostrando que el comportamiento de las márgenes es similar al desarrollado en el cuerpo de la cortina.



Sismo	Zonas de afectación	Sismo	Zonas de afectación	Sismo	Zonas de afectación
7	Base y corona	127	Corona	163	Base y corona
8	Base y corona	128	Corona	164	Base y corona
9	Base y corona	129	Corona	165	Base y corona
12	Base y corona	130	Base y corona	167	Base y corona
89	Base y corona	133	Altura media	170	Base
98	Base, altura media y corona	136	Base y altura media	172	Base
106	Altura media y corona	141	Base, altura media y corona	182	Base y corona
108	Corona	144	Base y altura media	183	Base y corona
109	Altura media	145	Base y corona	188	Base
110	Base, altura media y corona	151	Base y corona	184	Base y corona
111	Altura media y corona	152	Base	192	Base y corona
112	Altura media	153	Base, altura media y corona	201	Base y corona
113	Corona	155	Base, altura media y corona	202	Base y corona
117	Corona	156	Base y corona	203	Base y corona
119	Corona	158	Base y corona	214	Base y corona
123	Altura media y corona	162	Base y corona		

Tabla 4.5 – Sismos relevantes detectados en los registros de coherencia.

Nuevamente se observa mediante la tabla de sismos relevantes que la zona mayormente afectada por los eventos sísmicos fue la corona, en la cual hubo excitaciones provocadas por un total de 38 sismos de los 223 considerados en este análisis. Seguida a esta, la zona con mayores afectaciones como consecuencia de los sismos registrados fue la base, donde un total de 34 fenómenos sísmicos provocaron excitaciones de movimiento correlacionado con otra zona de la estructura, finalmente la zona menos afectada fue la correspondiente a la altura media.

4.4 – TIEMPO DE RETARDO

El tiempo de retardo es una variable que representa el tiempo que va defasado el movimiento de la entrada respecto al movimiento de la respuesta y esta dado por:

$$\varepsilon = \frac{\phi_{XY}(f)}{2\pi f} \dots \dots (4.4)$$

A continuación se muestran las figuras que representan a los registros sísmicos de tiempo de retardo elaborados por los instrumentos de monitoreo instalados en el cuerpo de la cortina, con la finalidad de identificar todos los fenómenos sísmicos que provocaron tiempos de retardo mayores, respecto al tiempo común que desarrollaron la mayoría de los eventos, considerando sobretodo, el intervalo de frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz.



Capítulo IV – Análisis dinámico

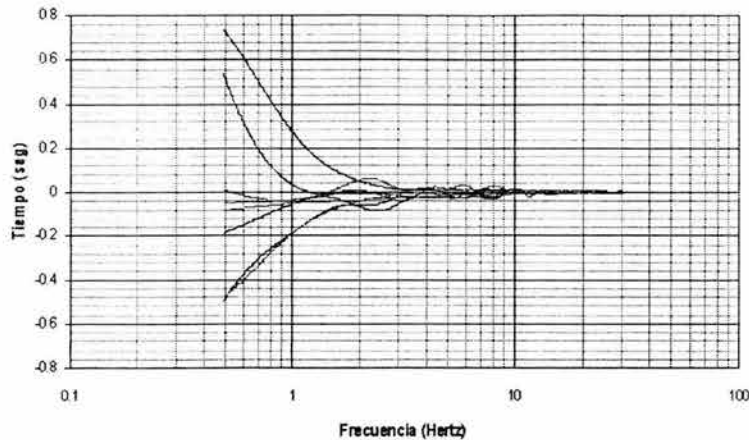


Figura 4.89 - Tiempo de retardo del deck 1 a la corona centro.

El registro sísmico de tiempo de retardo representado por la figura 4.89 exhibe que los eventos captados del acelerógrafo 1 al C, mantuvieron mayoritariamente valores de tiempo bajos para las frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, únicamente los sismos 98, 112 y 113, ya detallados en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, adquirieron para estas frecuencias, valores de tiempo mayores en comparación a los demás.

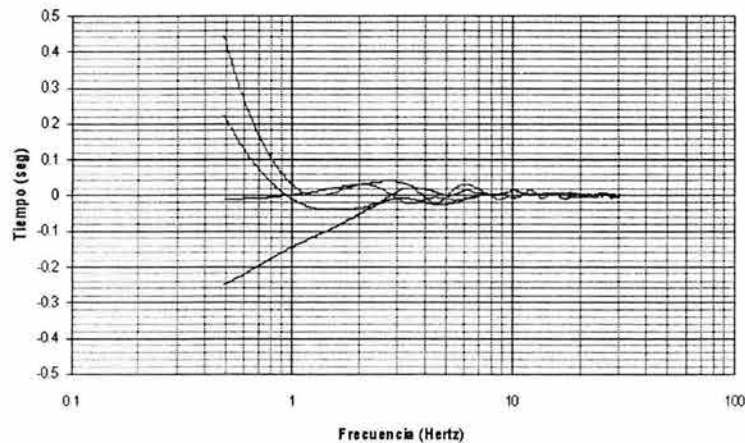


Figura 4.90 - Tiempo de retardo del deck 1 hacia aguas abajo en la corona.

Esta figura se obtuvo a partir del registro sísmico de tiempo de retardo elaborado por los instrumentos de monitoreo 1 y G, instalados en la elevación 35 y en la corona de la cortina respectivamente. Se observa que la mayoría de los fenómenos sísmicos percibidos provocaron durante su desarrollo valores de tiempo bajos en el intervalo de frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, únicamente el sismo 108 muestra tiempos mayores respecto a los otros sismos para este mismo intervalo.



Capítulo IV – Análisis dinámico

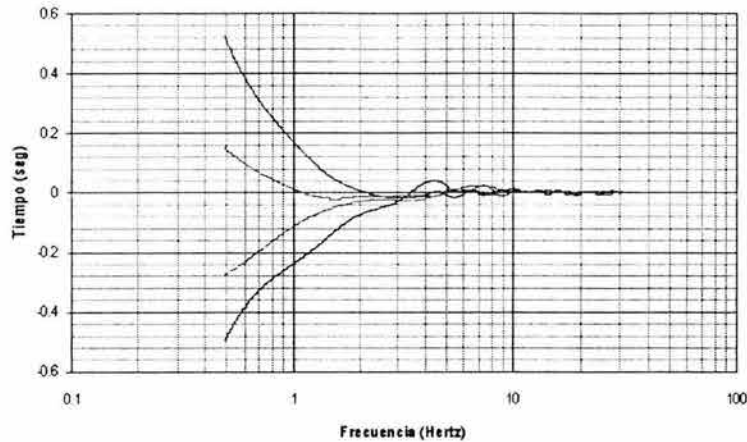


Figura 4.91 - Tiempo de retardo del deck 1 hacia aguas arriba en la corona.

Para este registro sísmico puede observarse que sólo fueron captados cuatro sismos por los instrumentos de monitoreo 1 y H, dos de los cuales provocaron para el intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.0 Hz tiempos de retardo mayores respecto a los demás, estos sismos están detallados en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II mediante los números 106 y 110.

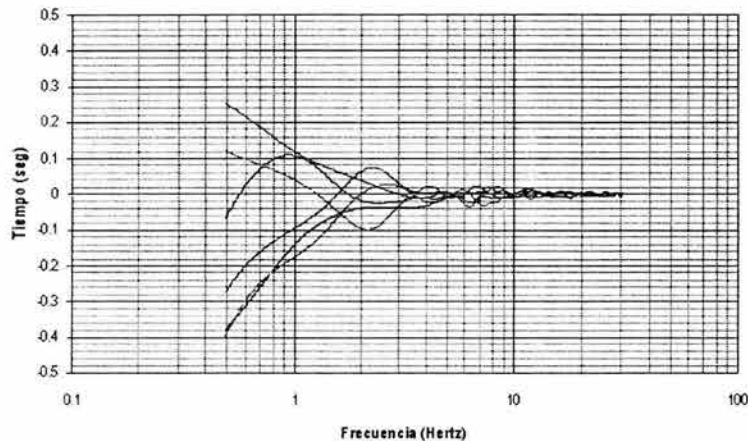


Figura 4.92 - Tiempo de retardo del deck 1 a la corona testigo.

Mediante esta figura, que representa al registro sísmico producto de los instrumentos de monitoreo 1 y T, instalados en la elevación 35 y en la corona de la cortina respectivamente, se deduce que de manera general los eventos percibidos provocaron durante su desarrollo valores de tiempo bajos, en este caso los sismos 108 y 110, ya detallados en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, alcanzaron valores de tiempo sobresalientes para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz.



Capítulo IV – Análisis dinámico

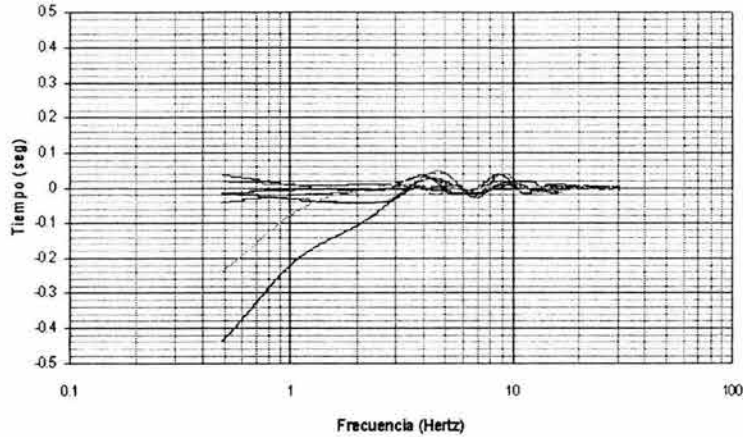


Figura 4.93 - Tiempo de retardo del deck 2 al deck 1.

Mediante esta imagen se puede observar para el registro sísmico 2 – 1, cuyos sismos fueron captados de la elevación 35 a la elevación 49.5 de la estructura, que la mayoría de los eventos causaron tiempos de retardo bajos durante su ocurrencia, a excepción de dos de ellos que para un intervalo de frecuencias comprendido entre 0.5 y 3.0 Hz, provocaron valores de tiempo sobresalientes, dichos sismos están referidos por los números 112 y 113 en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II.

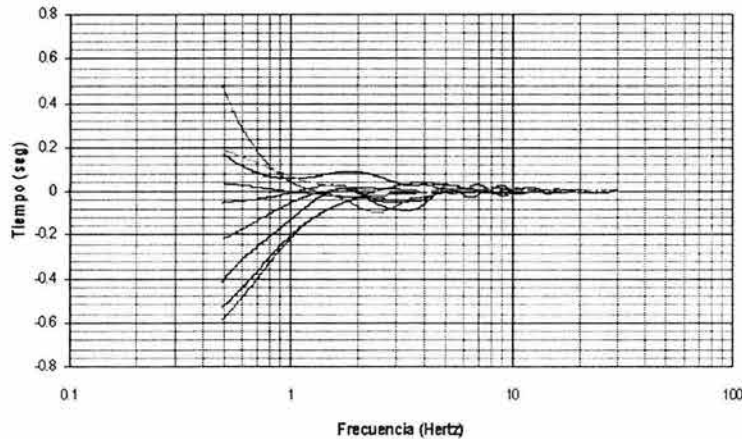


Figura 4.94 - Tiempo de retardo del deck 2 a la corona centro.

La figura 4.94 expone al registro sísmico de tiempo de retardo elaborado por los instrumentos de monitoreo 2 y C. En ella se observa que de manera general los fenómenos sísmicos percibidos mantuvieron durante su desarrollo tiempos de retardo bajos, sólo los sismos 101 y 112 presentaron en esta ocasión valores mayores respecto a los demás, en las frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz.



Capítulo IV – Análisis dinámico

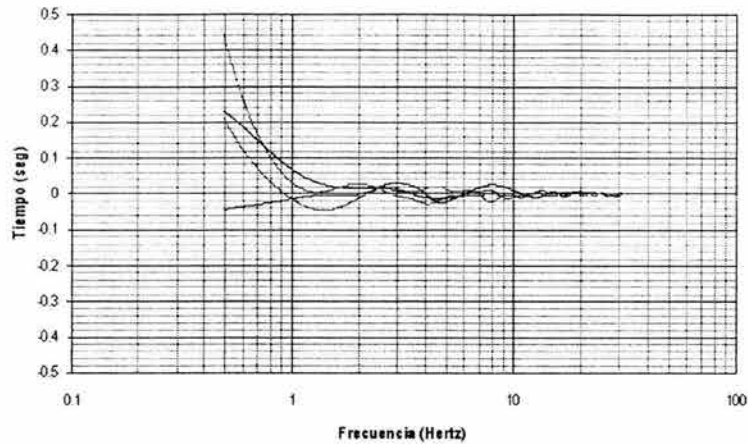


Figura 4.95 - Tiempo de retardo del deck 2 hacia aguas abajo en la corona.

La figura 4.94 representa al registro sísmico de tiempo de retardo producto de los equipos de monitoreo 2 y G, instalados en la elevación 49.5 y en la corona de la cortina respectivamente. Se visualiza que tres de los cuatro sismos captados por estos equipos, conservaron valores de tiempo bajos en el intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.0 Hz, la excepción fue el sismo 98 que para frecuencias menores a 1.0 Hz provocó valores de tiempo mayores respecto a los otros sismos.

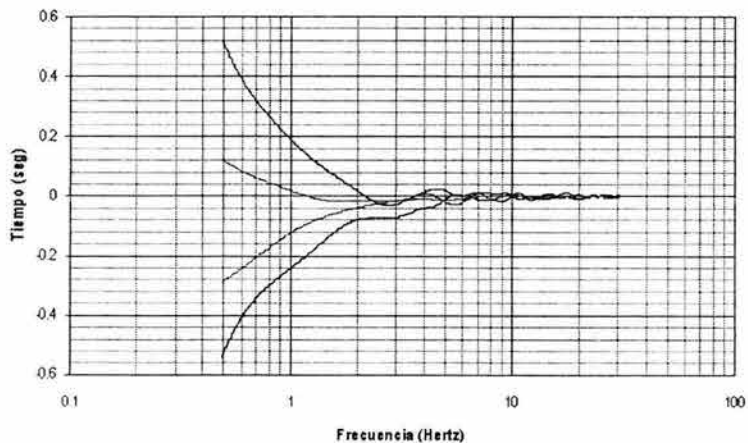


Figura 4.96 - Tiempo de retardo del deck 2 hacia aguas arriba en la corona.

El registro sísmico 2 – H, representado por la figura arriba expuesta, muestra que sólo dos de los cuatro eventos captados, de la elevación 49.5 a la corona de la cortina, provocaron valores de tiempo bajos en el intervalo de frecuencias comprendido entre 1.0 y 2.0 Hz, de tal forma que los sismos 106 y 110 originaron tiempos mayores para estas mismas frecuencias.



Capítulo IV – Análisis dinámico

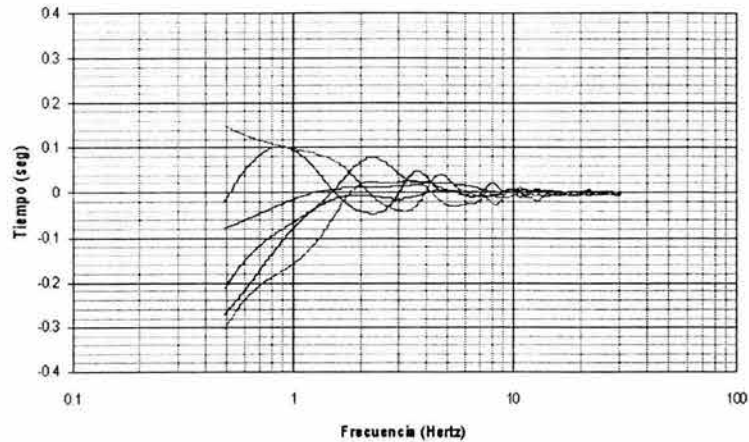


Figura 4.97 - Tiempo de retardo del deck 2 a la corona testigo.

Para el registro sísmico de tiempo de retardo 2 – T, se observa que en general los sismos captados de la elevación 49.5 a la corona de la cortina, provocaron valores de tiempo bajos en frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, contrariamente los eventos 106 y 110 causaron tiempos de retardo mayores, respecto a los demás, para el intervalo de frecuencias mencionado.

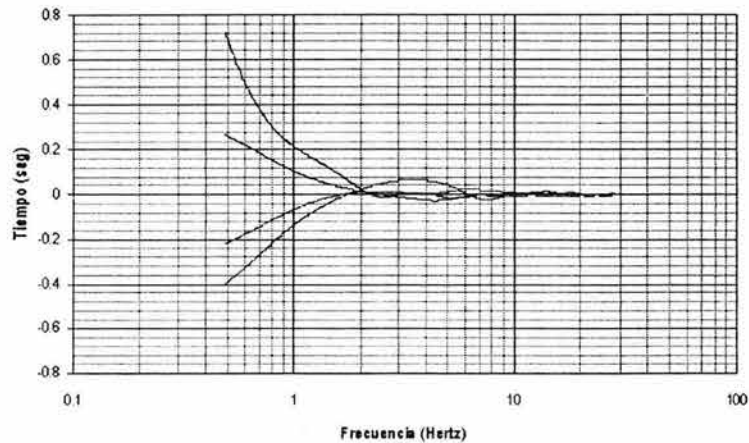


Figura 4.98 - Tiempo de retardo del inclinómetro 6 a la corona centro.

Para el registro sísmico de tiempo de retardo 6 – C, cuyos instrumentos están localizados en la elevación 30 y en la corona de la cortina respectivamente, se determinó que tres de los cuatro eventos percibidos provocaron valores de tiempo bajos en frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, únicamente el sismo 123 provocó para estas frecuencias tiempos mayores.



Capítulo IV – Análisis dinámico

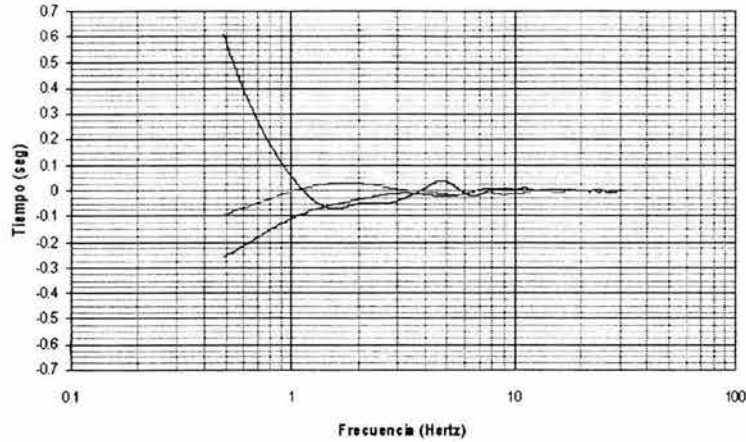


Figura 4.99 - Tiempo de retardo del inclinómetro 6 a la corona testigo.

La figura 4.99 corresponde al registro sísmico de tiempo de retardo elaborado por los acelerógrafos 6 y T, instalados en la elevación 30 y en la corona de la cortina. En la figura destaca de inmediato el valor de tiempo generado por el sismo 123 para frecuencias menores a 1.0 Hz, mientras que el par de sismos restante, provocaron para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, valores de tiempo menores.

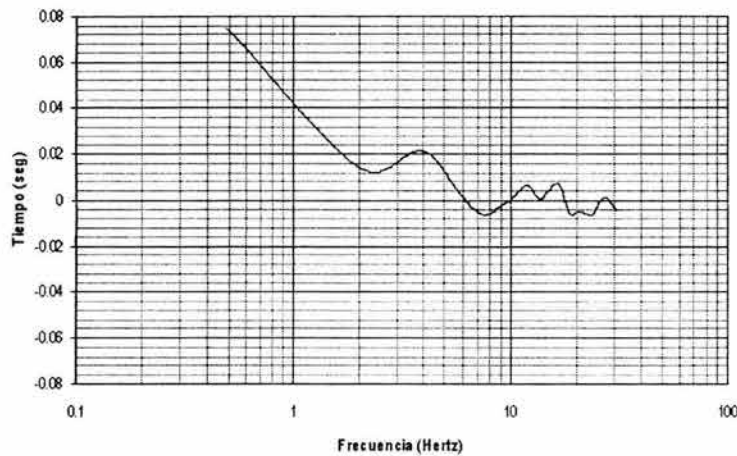


Figura 4.100 - Tiempo de retardo de la base centro al inclinómetro 6.

La figura 4.100 pretende describir el comportamiento de la estructura por efecto del sismo 119, lo cual resulta difícil debido a la falta de sismos que permitan comparar valores de tiempo.



Capítulo IV – Análisis dinámico

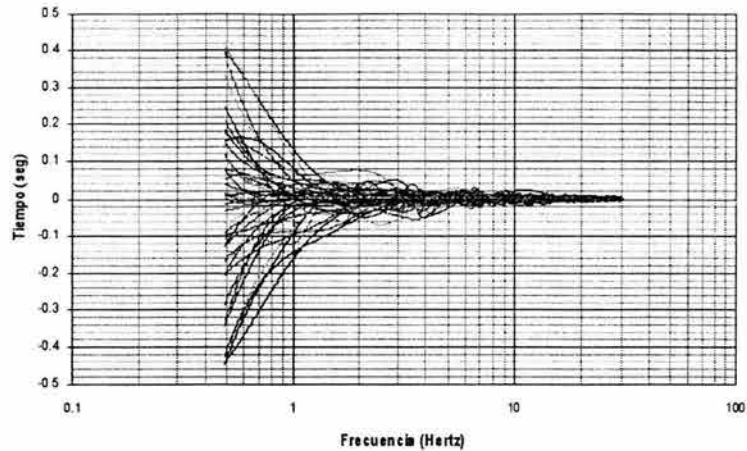


Figura 4.101 - Tiempo de retardo de la base centro a la corona centro.

La figura 4.101 representa uno de los registros sísmicos más importantes para la evaluación del comportamiento dinámico de la estructura, esto debido tanto a la cantidad de sismos captados como a la ubicación de los instrumentos de monitoreo. La imagen detalla que la mayoría de los eventos sísmicos provocaron valores de tiempo bajos, ya que en esta ocasión los eventos que contrariamente causaron valores de tiempo mayores para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, fueron los sismos 17, 119, 130, 190, 203, 205, 210 y 211.

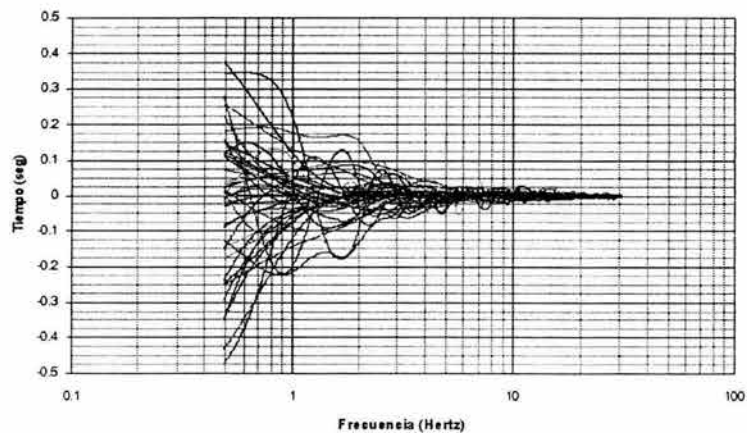


Figura 4.102 - Tiempo de retardo en la base de la cortina.

La figura 4.102 representa al registro sísmico de tiempo de retardo B – F, y exhibe, que de manera general los sismos captados por los acelerógrafos de la base de la cortina (Elevación 13.5), provocaron valores de tiempo de retardo bajos, sólo los sismos 131, 141, 144, 151, 155, 164, 165 y 172 adquirieron mayores tiempos para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz.



Capítulo IV – Análisis dinámico

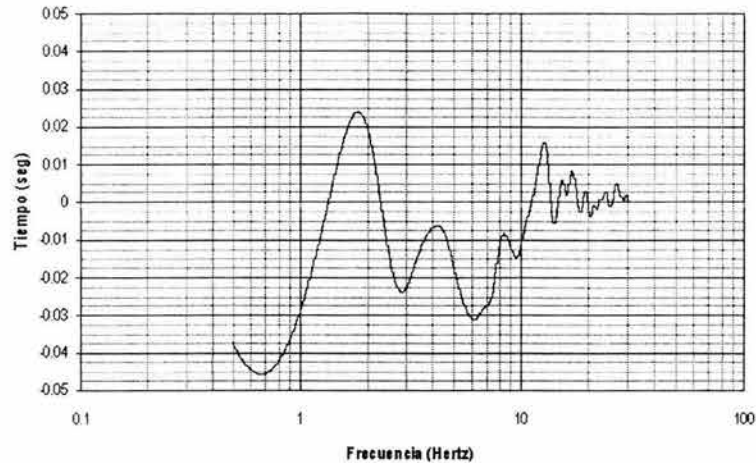


Figura 4.103 - Tiempo de retardo de la base centro hacia aguas abajo en la corona.

La figura arriba mostrada representa al registro sísmico de tiempo de retardo, producto de los equipos de monitoreo B y G. En ella sólo se exhibe un sismo, por lo que nuevamente se tiene el conflicto de no poder comparar valores de tiempo.

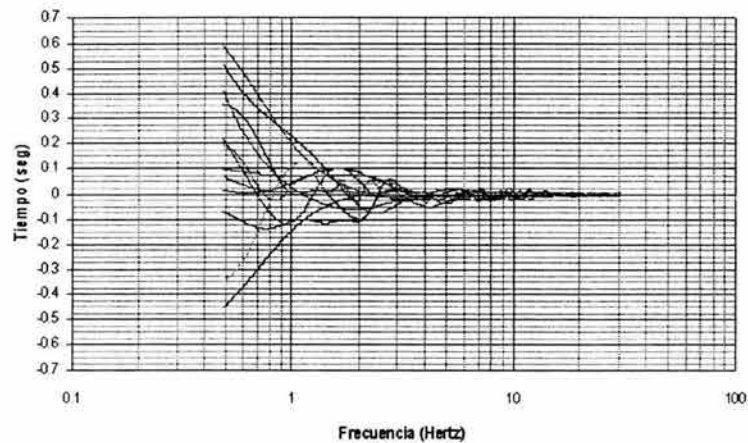


Figura 4.104 - Tiempo de retardo de la base centro al inclinómetro P.

Mediante esta figura se observó respecto al tiempo de retardo, que los fenómenos sísmicos captados del acelerógrafo B al P provocaron durante su ocurrencia valores de tiempo bajos, para las frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, únicamente cuatro sismos causaron para estas frecuencias tiempos de retardo mayores, dichos sismos están definidos en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II mediante las referencias numéricas 136, 138, 144 y 145.



Capítulo IV – Análisis dinámico

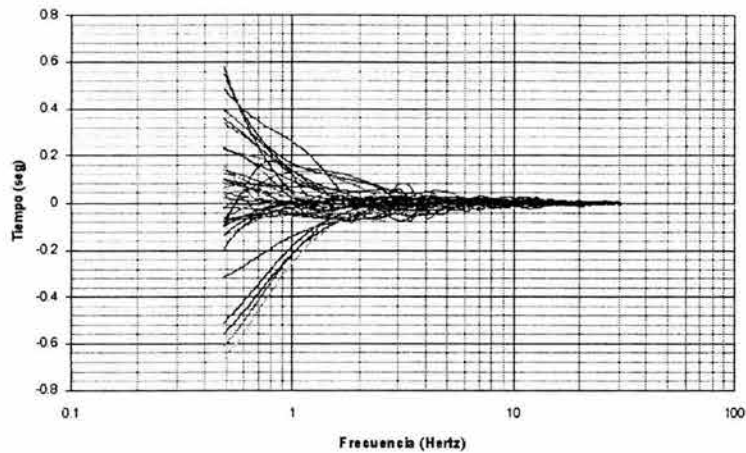


Figura 4.105 - Tiempo de retardo de la base centro a la corona testigo.

El registro sísmico de tiempo de retardo representado por la figura 4.105, muestra que la mayoría de los sismos captados del instrumento B al T, provocaron valores de tiempo de retardo bajos, sólo los eventos 130, 141, 143, 144, 145, 156, 163, 201 y 206 causaron valores mayores en frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz.

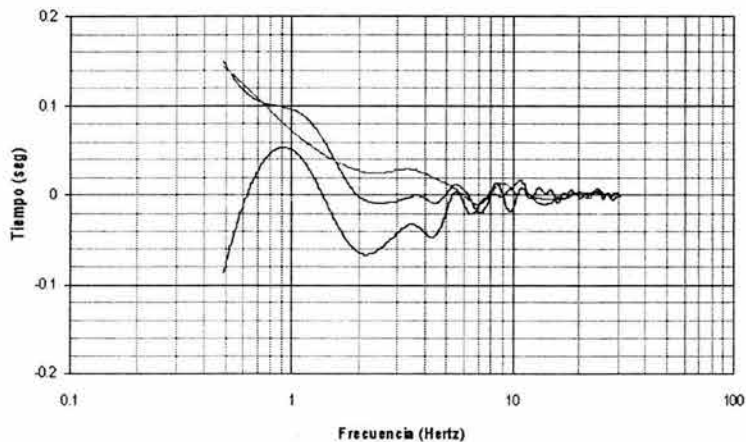


Figura 4.106 - Tiempo de retardo de la base al deck 1.

Esta figura es el resultado del registro sísmico elaborado por los instrumentos F y 1, localizados en las elevaciones 13.5 y 35 respectivamente, se observa que sólo fueron captados tres eventos sísmicos, que provocaron, durante su desarrollo valores de tiempo de retardo bajos para frecuencias comprendidas de 1.0 a 2.0 Hz.



Capítulo IV – Análisis dinámico

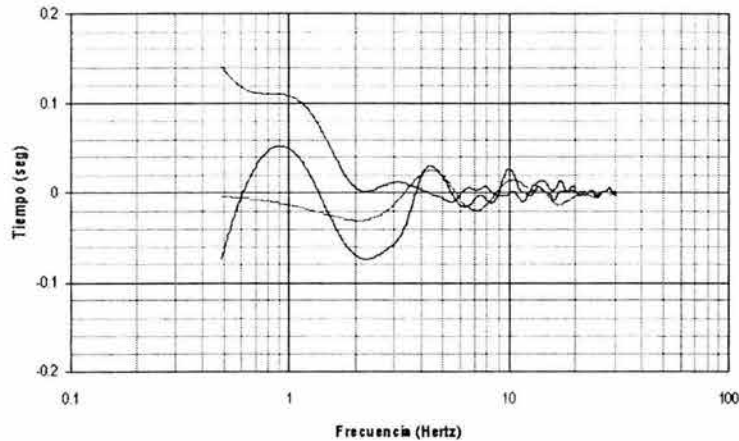


Figura 4.107 - Tiempo de retardo de la base al deck 2.

Para el registro sísmico de tiempo de retardo F – 2, representado por la figura 4.107 y elaborado por los instrumentos de monitoreo que se localizan en las elevaciones 13.5 y 49.5, se observó que todos los sismos percibidos provocaron durante su ocurrencia tiempos de retardo bajos en frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz.

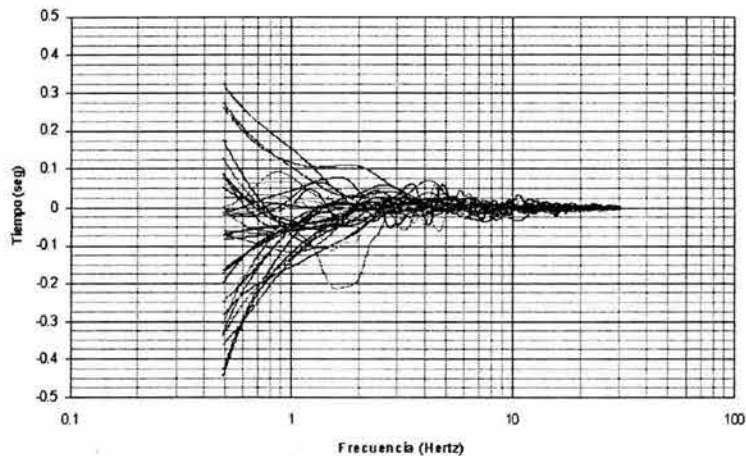


Figura 4.108 - Tiempo de retardo de la base a la corona centro.

Esta figura corresponde al registro sísmico de tiempo de retardo F - C, cuyos sismos fueron captados de la base (Elevación 13.5) a la corona de la cortina. Del análisis hecho se determinó que mayoritariamente los eventos provocaron valores de tiempo de retardo bajos en frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, sin embargo, también puede verse que una buena cantidad de sismos originó tiempos mayores en estas frecuencias, dichos sismos están detallados en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II mediante los números 110, 166, 170, 173, 182, 185, 192, 206 y 208.



Capítulo IV – Análisis dinámico

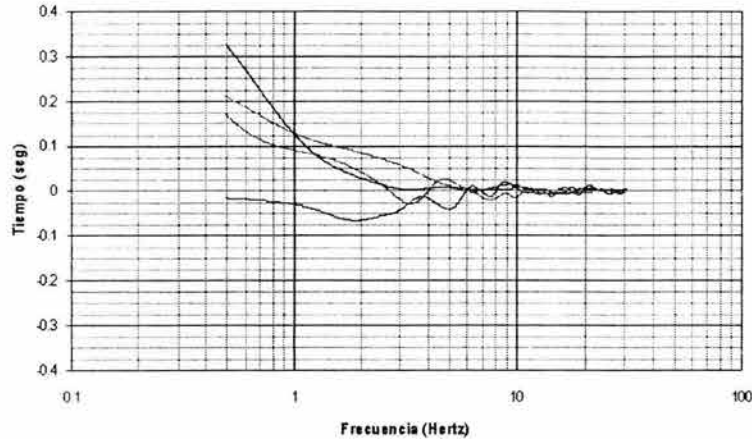


Figura 4.109 - Tiempo de retardo de la base hacia aguas abajo en la corona.

Este registro sísmico, que involucra a los instrumentos de monitoreo F y G, instalados en la elevación 13.5 y en la corona de la cortina respectivamente, muestra que tres de los cuatro sismos percibidos provocaron valores de tiempo bajos durante su ocurrencia, únicamente el sismo 110 causó para el intervalo de frecuencias entre 1.0 y 2.0 Hz tiempos de retardo mayores.

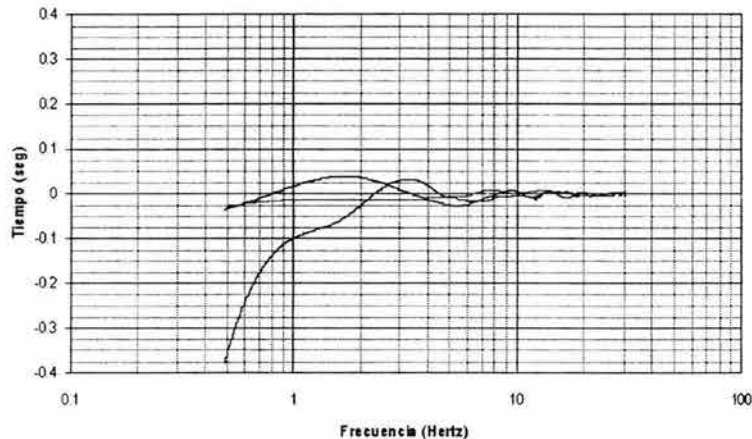


Figura 4.110 - Tiempo de retardo de la base hacia aguas arriba en la corona.

La figura 4.110 corresponde al registro sísmico de tiempo de retardo F – H, instrumentos que están localizados en la base (Elevación 13.5) y en la corona de la cortina respectivamente, de su análisis se concluyó que dos de los tres sismos captados originaron valores de tiempo bajos en frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, la excepción fue el sismo 89, del cual existe más información en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, ya que provocó en las frecuencias citadas tiempos de retardo mayores.



Capítulo IV – Análisis dinámico

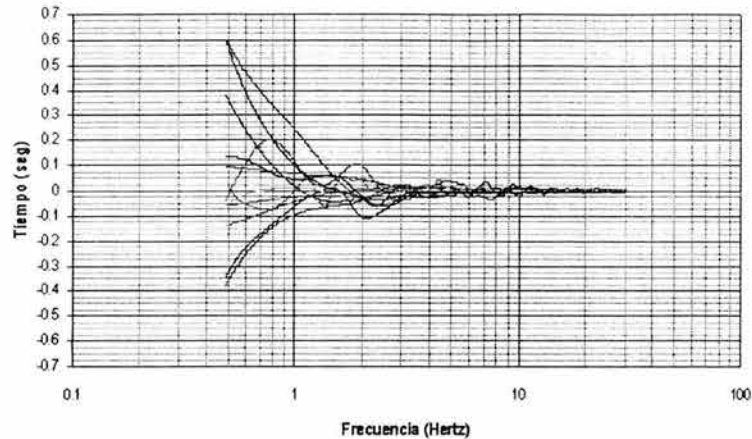


Figura 4.111 - Tiempo de retardo de la base al inclinómetro P.

Para el registro sísmico de tiempo de retardo F – P, se puede observar que de manera general los sismos percibidos provocaron durante su ocurrencia valores de tiempo bajos, únicamente dos de ellos adquirieron en frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, valores mayores, dichos sismos se encuentran detallados en el capítulo II mediante la referencias numéricas 145 y 154.

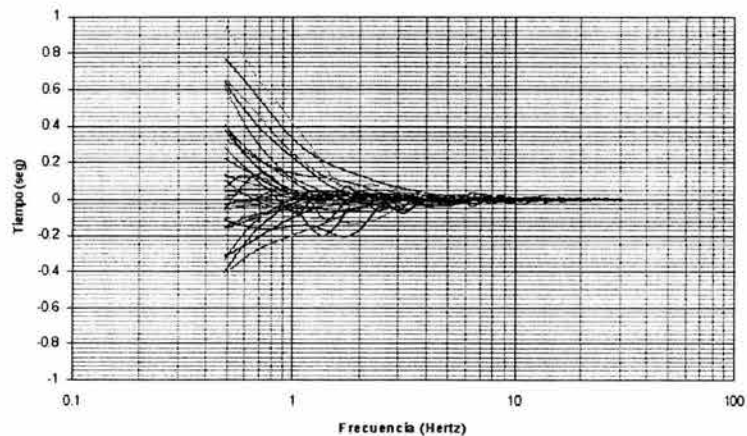


Figura 4.112 Tiempo de retardo de la base a la corona testigo.

La figura 4.112 corresponde al registro sísmico elaborado por los instrumentos F y T. La imagen exhibe que la mayoría de los fenómenos sísmicos captados por dichos instrumentos originaron tiempos de retardo bajos durante su ocurrencia, aunque también se visualiza que bastantes fueron los eventos que en frecuencias comprendidas de 1.0 a 2.0 Hz, provocaron tiempos de retardo mayores, tales sismos están detallados en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II mediante los números 89, 98, 130, 134, 141, 155, 156, 162, 165 y 166



Capítulo IV – Análisis dinámico

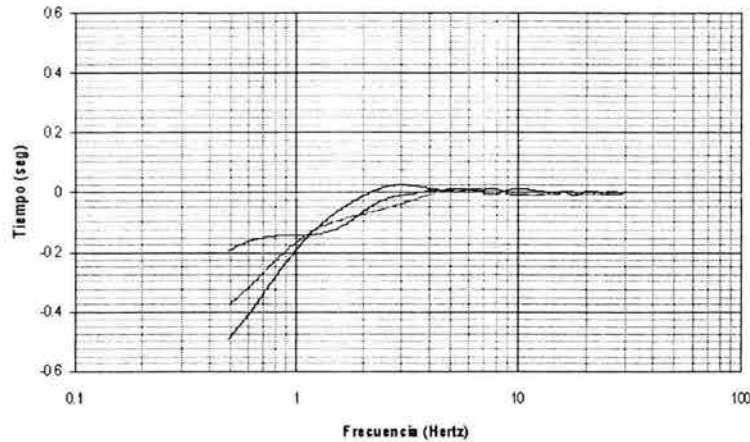


Figura 4.113 - Tiempo de retardo de aguas abajo hacia aguas arriba en la corona.

Para el registro sísmico G – H, cuyos instrumentos se encuentran en la corona de la cortina, se visualiza que sólo un sismo de los tres percibidos, provocó tiempos de retardo bajos durante su ocurrencia, en frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, mientras que los dos eventos restantes, en comparación a este, originaron valores de esta variable mayores en dichas frecuencias, estos sismos están referidos dentro del capítulo II por los números 108 y 110.

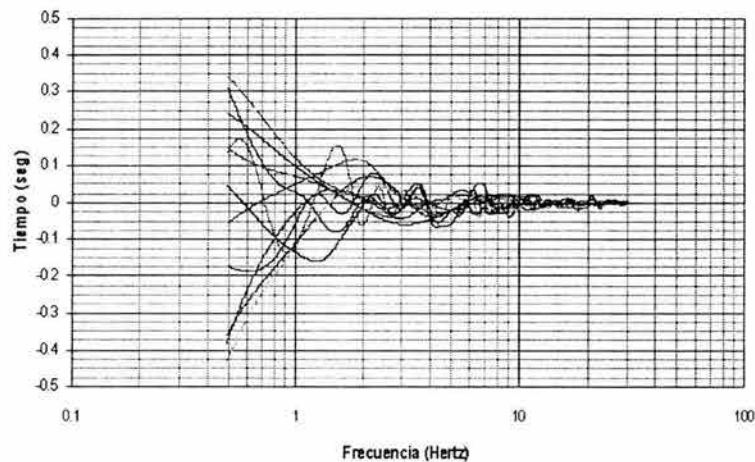


Figura 4.114 - Tiempo de retardo del inclinómetro P a la corona testigo.

La figura 4.114 corresponde al registro sísmico de tiempo de retardo elaborado por los instrumentos de monitoreo P y T. Se observa que la mayoría de los fenómenos sísmicos provocaron durante su desarrollo tiempos de retardo bajos, a excepción de dos de ellos que en frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, originaron valores de tiempo mayores en comparación al resto, estos sismos están detallados en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II, mediante los números 151 y 155.

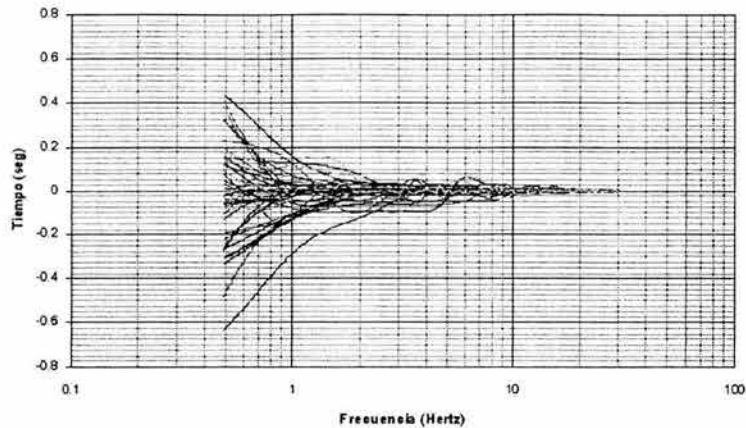


Figura 4.115 - Tiempo de retardo de la corona testigo a la corona centro.

Esta imagen pertenece al registro sísmico elaborado por los equipos de monitoreo T y C, de ella se determinó que la mayoría de los sismos percibidos provocaron valores de la variable en cuestión, bajos, aunque bastantes fueron los eventos que contrariamente a esta característica adquirieron valores de tiempo mayores, esto para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz. Dichos eventos están detallados en las estadísticas del capítulo II por medio de los números 98, 106, 108, 110, 113, 117, 119, 125, 127 y 129.

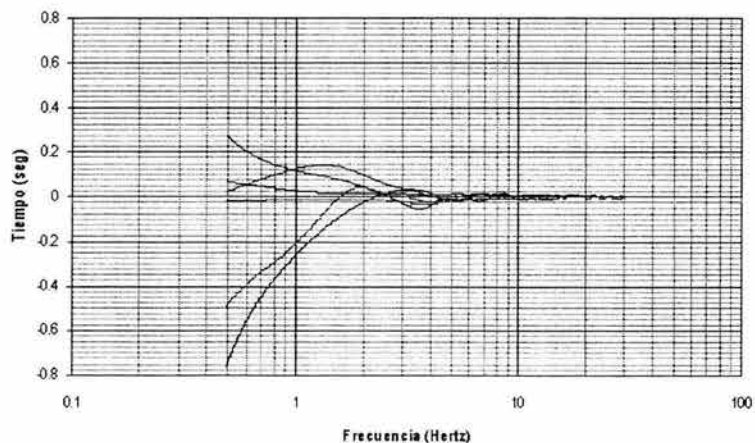


Figura 4.116 - Tiempo de retardo del testigo de la corona hacia aguas abajo de la corona.

Para el registro sísmico de tiempo de retardo T – G, cuyos instrumentos están instalados en la corona de la cortina, se visualiza que cuatro de los seis sismos captados provocaron valores de tiempo bajos en frecuencias comprendidas de 1.0 a 2.0 Hz, de manera que los dos eventos restantes originaron para tales frecuencias, valores mayores de esta variable, dichos sismos están detallados en el capítulo II y pueden encontrarse por los números 89 y 98.



Capítulo IV – Análisis dinámico

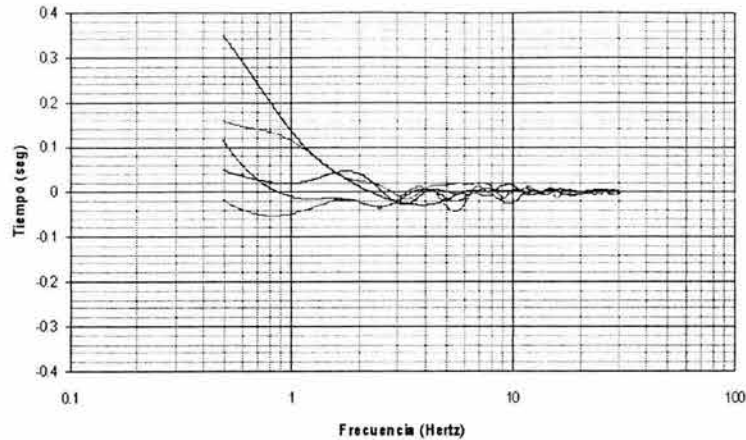


Figura 4.117 - Tiempo de retardo de la corona testigo hacia aguas arriba en la corona.

Mediante esta figura, relacionada al registro sísmico de tiempo de retardo elaborado por los instrumentos de monitoreo T y H, se dedujo que mayoritariamente los fenómenos sísmicos percibidos provocaron valores de tiempo de retardo bajos, únicamente el sismo 108 generó valores mayores en comparación con el resto, para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz.

Mediante el análisis hecho a los registros sísmicos de tiempo de retardo, ilustrados por las figuras 4.89 a 4.117, se detectó que de manera general y para toda la estructura, los diferentes fenómenos sísmicos considerados provocaron para frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz valores de tiempo de retardo bajos y que las excepciones, es decir, los valores altos, fueron causa de sismos de mayor magnitud. Para todos los registros analizados en esta variable, se observó que los máximos valores de tiempo de retardo en el intervalo de frecuencias citado, no exceden el valor de 0.4 segundos y fueron encontrados en los registros sísmicos 1 – C, B – T, F – P, F – T y T- C para el cuerpo de la cortina y en los registros D – B, D – C, D – F, D – I, I – F e I – G para las márgenes de la misma. Otra cosa que puede mencionarse de este análisis es que en todos los casos los valores de tiempo se van reduciendo al excederse una frecuencia de 3.0 Hz.

Sismo	Zonas de afectación	Sismo	Zonas de afectación	Sismo	Zonas de afectación
17	Base	131	Base	165	Base y corona
89	Base y corona	134	Base y altura media	166	Base y corona
98	Base, altura media y corona	136	Base y altura media	170	Base y corona
101	Corona	138	Base y corona	172	Base
106	Altura media y corona	141	Base y corona	173	Base y corona
108	Altura media y corona	143	Base y corona	182	Base y corona
110	Base, altura media y corona	144	Base, altura media y corona	185	Base y corona
112	Altura media y corona	145	Base, altura media y corona	190	Base
113	Altura media y corona	151	Base, altura media y corona	192	Base y corona
117	Corona	154	Base y altura media	201	Base y corona
119	Base y corona	155	Base, altura media y corona	205	Base
125	Corona	156	Base y corona	206	Base y corona
127	Corona	162	Base y corona	208	Base y corona
129	Corona	163	Base y corona	210	Base
130	Base y corona	164	Base	211	Base

Tabla 4.6 – Sismos relevantes detectados en los registros de tiempo de retardo.



De la tabla 4.6 se observó, para el caso del tiempo de retardo, que la zona mayormente afectada a causa de los sismos considerados en este análisis, fue la base, ya que en esta región un total de 36 eventos produjeron excitaciones considerables, la zona que sigue a la base respecto a la cantidad de excitaciones provocadas fue la corona, ya que un total de 34 fenómenos fueron los responsables de valores de tiempo de retardo altos.

Se observó del análisis hecho a los registros sísmicos de tiempo de retardo, elaborados por los acelerógrafos de las márgenes de la presa José María Morelos, mucha similitud con el comportamiento presentado por el cuerpo de la cortina, la única variante detectada fue que en las márgenes de la cortina el valor máximo de tiempo de retardo provocado en una frecuencia comprendida entre 1.0 y 2.0 Hz, fue de aproximadamente 0.4 segundos, mientras que para el cuerpo de la cortina, este valor máximo se aproximó a 0.3.

Como ya se había citado, mediante el análisis hecho a los registros sísmicos de la función de transferencia se determinó que la frecuencia característica para la componente longitudinal de los movimientos de la cortina de la presa José María Morelos tiene un valor aproximado de 1.5 Hz. Otro resultado importante, obtenido a partir del análisis hecho a los registros sísmicos de las variables de coherencia, ángulo de fase y tiempo de retardo, es que al ser semejantes los valores, variaciones y formas de las curvas de cada una de estas variables, en frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, es indicativo de que la cortina ante todos los sismos tuvo un comportamiento similar.

Por último en este capítulo, cabe mencionar que todos los eventos sísmicos separados del comportamiento común por haber provocado excitaciones en diferentes puntos de la cortina y para todas las variables analizadas, serán considerados para presentar en las conclusiones, los efectos provocados en la presa como consecuencia de su ocurrencia; así mismo, todos aquellos registros donde no se hayan detectado sismos fuera del comportamiento común, no serán considerados para los resultados de este análisis dinámico. Debe destacarse que los sismos mayormente separados del comportamiento común fueron los detallados en las tablas 2.2 y 2.4 del capítulo II mediante los números 89, 98, 108, 110, 119, 136, 141, 155, 156, 162, 165, 182 y 192, por lo que estos eventos y otros como el del 19 de septiembre de 1985, serán los más significativos para el desarrollo de las conclusiones.



5 – CONCLUSIONES

- En general, y como consecuencia de los sismos más comunes, cuyas magnitudes oscilan entre los 4 y 6 grados Richter, las aceleraciones en la componente longitudinal de los movimientos de la cortina de la presa José María Morelos adquieren valores menores a los 15 cm/s². En cambio las aceleraciones máximas de la componente en estudio fueron provocadas por sismos de magnitudes mayores, particularmente el valor máximo de aceleración observado para todas las estaciones de la cortina corresponde al sismo del 19 de septiembre de 1985, ya que en la estación de la corona provocó una aceleración de 305 cm/s², sin embargo, deben tomarse en cuenta los desplazamientos independientes que sufre la caseta donde se aloja el acelerógrafo C respecto a la cortina, con lo cual se registran aceleraciones mayores no representativas de la respuesta de la cortina.
- La frecuencia característica, encontrada mediante los espectros de respuesta y los registros de la función de transferencia para el cuerpo de la cortina en su componente longitudinal, se aproxima a un valor de 1.5 Hz, que se asemeja al determinado en trabajos anteriores de 1.32 Hz, con la diferencia de que en estos trabajos fueron consideradas las tres componentes de movimiento. Para las márgenes de la presa se observó una frecuencia característica, próxima a 8.0 Hz, que no ha sido relacionada con efectos serios en la cortina, ya que se aleja del fenómeno de resonancia. Estos resultados no son estrictamente concluyentes debido a la falta de información de sismos fuertes, pues como se observó la mayoría de los eventos considerados en este análisis fueron de magnitudes comprendidas entre 4 y 6 grados Richter.
- Las funciones de coherencia muestran en general valores menores a 0.8, con algunos valores aislados próximos a la unidad, provocados principalmente por los sismos de mayor magnitud. Esto indica que la estructura tiene una buena capacidad para amortiguar la energía sísmica, al menos de los sismos promedio con magnitudes menores a los 6° Richter que ocurren en la zona, además para tal efecto, posiblemente el espesor de aluvión donde se construyó la pantalla de concreto cubra parte de tal amortiguamiento.
- Debido a la semejanza en los valores, variaciones y formas de los registros sísmicos de coherencia, ángulo de fase y tiempo de retardo para las frecuencias comprendidas entre 1.0 y 2.0 Hz, se concluye que la estructura tuvo un comportamiento similar y positivo ante todos los sismos considerados en este análisis.
- El análisis hecho a la presa José María Morelos ha demostrado que los sismos fuertes actuando sobre presas de tierra y enrocamiento son capaces de producir deformaciones de gran importancia e incluso permanentes. Como es sabido, nuestro país es uno en los que existe mayor actividad sísmica en el mundo, por lo tanto cualquiera de estas obras puede estar expuesta a un sismo de estas características, y debe ser importante tener en cuenta que ningún terraplén alto debe considerarse esencialmente seguro contra temblores de tal forma que todas las presas importantes y sobretodo las planeadas en zonas de alta actividad sísmica deben diseñarse conscientemente a prueba de daños por sismo.
- Los resultados que se incluyen en este escrito no son determinantes, ya que sólo se analiza la forma en que responde la cortina en la dirección longitudinal al eje de la presa, sin embargo, muestra aspectos muy interesantes del comportamiento sísmico de la presa.



- A pesar de que las características de los sismos analizados han llegado de manera diferente a la presa José María Morelos, la respuesta de la cortina ha sido similar, lo que permite concluir que el comportamiento de la estructura no depende significativamente de los parámetros propios de los eventos. Quizá el estrato de aluvión sobre el que descansa la presa contribuye de manera importante para uniformizar las características del movimiento provocado por cada evento en la cortina.
- Se observó del análisis hecho que los sismos con magnitudes próximas o mayores a los 6° Richter fueron los que provocaron aceleraciones superiores a los 100 cm/s². Además resulta confusa la relación existente entre las características de un sismo (magnitud, distancia epicentral y profundidad focal) y la aceleración adquirida en las diferentes regiones de la cortina. Por ejemplo el sismo del 11 de enero de 1997 cuya magnitud fue de 6.9° Richter, una distancia epicentral de 92 km y profundidad focal igual a 16 km, generó en la corona (acelerógrafo C) una aceleración casi 4 veces mayor que la producida por el sismo del 30 de abril de 1986 de magnitud igual a 7.0° Richter, distancia epicentral de 94 km y profundidad focal de 20 km.
- En la presa José María Morelos han sido instalados durante su vida útil al menos 13 acelerógrafos, muchos de los cuales sólo fueron utilizados durante periodos de prueba y otros han tenido que retirarse debido a inundaciones de las casetas donde se alojaban, actualmente en la presa existen, con capacidad para registrar fenómenos sísmicos, seis acelerógrafos que cubren las zonas más importantes de la estructura (base, corona y ambas márgenes). Sin embargo, la información sísmica obtenida mediante estos equipos ha resultado insuficiente para varias regiones de la cortina, especialmente para sismos de gran magnitud durante los cuales los instrumentos han presentado problemas, por lo tanto, para obtener un mejor conocimiento del comportamiento dinámico de la presa es recomendable en primer lugar dar un mantenimiento adecuado a los equipos, lo cual llevará a obtener mediciones más confiables y de ser posible disponer de una cantidad suficiente de acelerógrafos, distribuidos de una manera estratégica, para registrar en más puntos los movimientos de la cortina y las márgenes, con lo cual se ampliará el conocimiento sobre la respuesta dinámica de la presa.
- Debido a que el método utilizado para evaluar el comportamiento dinámico de la presa José María Morelos se basa en los registros elaborados por los acelerógrafos instalados en la cortina, debe hacerse hincapié en la importancia de la instrumentación sísmica, sobretodo en presas, que como esta, se localizan en zonas de alta actividad sísmica, por lo tanto es recomendable mejorar la confiabilidad de la instrumentación.
- Definitivamente la instrumentación sísmica instalada en la presa hace posible definir los efectos de los sismos sobre presas de tierra, lo cual constituye una información invaluable para el desarrollo de métodos de análisis, que a su vez sean herramientas esenciales para el estudio del comportamiento de otras presas ya construidas o en etapa de planeación. Pero no es suficiente sólo esto, pues deben tomarse en cuenta también los parámetros relacionados con la acción sísmica, como son las propiedades dinámicas de la estructura, los materiales constitutivos y los cambios que estos sufren con el tiempo o por la ocurrencia de fenómenos sísmicos. Como se ve, este campo requiere de un gran esfuerzo de investigación para llegar a comprender mejor el comportamiento de presas bajo cargas dinámicas.



- Como efecto de los sismos del 14 de marzo de 1979 (10) y del 25 de octubre de 1981 (11), se produjo un asentamiento al nivel de la corona, que se asocio con la generación de una zona de extensión en sentido transversal al eje de la presa, la cual a su vez generó en la corona grietas discontinuas y longitudinales al eje de la presa entre los cadenamientos 0+270 y 0+350. Estas grietas tuvieron una abertura de 1.0 a 1.5 cm y se localizaron en la cercanía del parapeto de aguas abajo de la corona.
- El sismo del 11 de octubre de 1975 provocó un asentamiento máximo al nivel de la corona de 2.5 cm mismo que se asocio a un desplazamiento horizontal paralelo al río de 1.0 cm, análogamente, el sismo del 14 de marzo de 1979 generó un asentamiento de 4.5 cm y un desplazamiento de 2.0 cm, mientras que el sismo del 25 de octubre de 1981 con una magnitud menor a la del citado anteriormente, provocó un asentamiento de 14.4 cm y desplazamiento de 9.0 cm, estos hechos sugieren que la presa José María Morelos ha sufrido asentamientos y desplazamientos horizontales que aumentan significativamente al ocurrir un sismo importante o por la simple recurrencia de eventos sísmicos. Así es que, si bien la magnitud de las deformaciones es moderada, su tendencia apunta hacia una gradual pérdida de la sección y degradación de la estructura, que sin embargo, no pone en peligro la estabilidad de la misma.
- El sismo del 19 de septiembre de 1985 sin duda alguna ha sido el más fuerte en la historia de la presa José María Morelos, su ocurrencia generó asentamientos medidos en 31.8 cm en el talud de aguas arriba y de 21.8 cm en el de aguas abajo, mientras que en la corona provocó un asentamiento de 12 cm. Todos estos asentamientos se relacionaron con desplazamientos horizontales que a su vez generaron grietas longitudinales al nivel de la corona, cercanas tanto al parapeto de aguas arriba como al de aguas abajo. La longitud de dichas grietas estuvo próxima a los 100 m y tuvieron una abertura de 0.5 a 1.0 cm.
- Como efecto de los sismos actuantes sobre la presa José María Morelos, también esta el de la pérdida de 62 cm de bordo libre debido a los asentamientos generados por tales eventos.
- Del historial sísmico considerado para la realización de este análisis, se observó que los eventos por subducción entre la Placa Oceánica de Cocos y la Placa Continental Norteamericana, son los que han generado, para el periodo 1972 - 2003, los efectos más significativos en la cortina de la presa José María Morelos.
- La distribución de los asentamientos muestra un patrón muy regular de comportamiento, donde el valor máximo corresponde a la parte superior y decrece rápidamente respecto a la altura de la cortina, hasta la elevación coincidente con la zona de contacto con los depósitos aluviales. De igual forma los desplazamientos horizontales, que están relacionados con los asentamientos y su magnitud, tienen valores máximos al nivel de la corona y decrecen con la altura de la cortina. Esto sustenta lo identificado en el análisis dinámico, hecho en el capítulo IV, pues según se observó la zona mayormente afectada por la ocurrencia de sismos fue la corona de la estructura.
- El análisis presentado dentro del capítulo IV permitió identificar que los niveles máximos de aceleración en la componente longitudinal se desarrollaron al nivel de la corona y fueron generados mayoritariamente por sismos con magnitudes superiores a los 6° Richter. Otra región donde se detectaron algunas aceleraciones considerables, aunque en menor proporción a la ya citada, fue la base de la estructura, mientras que para las demás zonas se observo un comportamiento más general, con aceleraciones mas bajas.



- No obstante a lo referido en los puntos anteriores, los efectos causados por los diferentes fenómenos sísmicos sobre la presa José María Morelos, han sido en general de poca importancia, a excepción de las grietas observadas en la corona. Concluyendo que el riesgo de falla de la presa es relativamente bajo, al menos considerando que sea expuesta a un sismo tan fuerte como el del 19 de septiembre de 1985.
- Personalmente y como experiencia la realización de este trabajo me dejó satisfacciones muy gratas, en primer lugar me abrió la puerta de un campo ingenieril poco abarcado, que cada vez adquiere mayor importancia, ya que mediante estos análisis se crean o perfeccionan los métodos de análisis con los que se diseñaran las futuras presas planeadas, sobretodo en zonas de actividad sísmica; sin embargo no fue un trabajo fácil pues requirió del proceso de mucha información, específicamente la utilizada para el análisis dinámico, constituido en esencia por gráficas construidas a través de los datos proporcionados por los registros sísmicos realizados por los acelerógrafos de la presa José María Morelos.



BIBLIOGRAFIA

- CFE, (1980), "Comportamiento de las Presas El Infiernillo y La Villita incluido el sismo de marzo 14, 1979", CFE, México.
- CFE, (1976), "Comportamiento de Presas Construidas en México", Contribución al XII Congreso Internacional de Grandes Presas, México.
- CFE, (2001), "Ingeniería Conceptual del p. H. Ampliación La Villita, Mich.", Informa Parcial, CFE, México.
- 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.
- 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), "Seismic Response Analysis of El Infiernillo and La Villita Dams", Volumen Marsal, México, D. F.
- <http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/sup.html>
- <http://mich.inegi.gob.mx/territorio/espanol/regcuencas2.htm>
- <http://www.semarnat.gob.mx/michoacan/geologia.shtml>
- <http://www.semarnat.gob.mx/michoacan/ubicacion.shtml>
- http://webs.ono.com/usr047/luisandelas/tema03_4.html
- http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_circ.html