

78



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISION DE INGENIERIA CIVIL, TOPOGRAFICA Y GEODESICA

"ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO
DE LA PRESA CHICOASEN".

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
MARIA LUISA MARTINEZ GONZALEZ

DIRECTOR: M.I. REGINALDO JOSE HERNANDEZ ROMERO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F.

2002



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/006/99

Señorita
MARIA LUISA MARTINEZ GONZALEZ
Presente

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

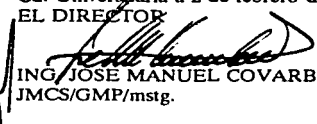
"ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO DE LA PRESA CHICOASEN"

- I. INTRODUCCION**
- II. GENERALIDADES DE LA PRESA**
- III. METODO DE ANALISIS**
- IV. COMPORTAMIENTO DINAMICO**
- CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 2 de febrero de 1999.
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARBRUBIAS SOLIS
JMCS/GMP/mstg.

No cierres los ojos a tus sueños,
es tu instinto de grandeza,
el que habla a través de ellos.
Dios no te hubiera dado la capacidad
de soñar, sin darte los medios,
para convertir tus sueños en realidad.

Dedicada a:

A Dios:

Por que me ha dado la oportunidad de esta aventura irrepitible que es la vida, y me dio una gran familia.

A mis Padres:

José Guadalupe Martínez Vega y María Guillermina González Islas
Por ser ejemplo de vida por que gracias a su amor, a su apoyo incondicional, su sacrificios, su entusiasmo y dedicación han logrado que se cumpla uno más de mis sueños, muchas gracias por que esto no habría sido posible sin ustedes.

A mis Hermanos:

Lolita, Paco, Abby y Guille

Por que siempre han estado conmigo, por que su entusiasmo y alegría siempre han sido un motor importante para no desanimarme y luchar por todas las metas propuestas pero sobre todo por que nunca dudaron que podía lograrlo gracias.

A Jorge Alberto Guerra

Por tu apoyo e insistencia para motivarme a cerrar un ciclo en mi vida, gracias por estar aquí , ahora y siempre. Te amo.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

Por que me dio la oportunidad de ser lo que soy, a mi Prepa 8 donde empece a dar clases , a mi Facultad de Ingeniería que me ha hecho crecer como persona, a cada uno de mis Profesores que han dejado huella en este trayecto, estoy infinitamente agradecida con mi UNAM.

AGRADECIMIENTOS:

A el M.I. Reginaldo José Hernández Romero

Por todo el apoyo brindado en la elaboración de este trabajo, porque su ayuda y orientación como mi director de tesis han sido fundamentales, gracias por ayudarme a alcanzar esta meta, por que siempre tuvo una palabra de animo sabia que podíamos lograrlo, por que ha sido más que un Profesor un Amigo incondicional, por que en momentos difíciles ha estado para apoyarme gracias por confiar en mí.

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

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

A las Señoras Ángela , Alicia , Inés , María Silvia Secretarias de la División de Ingeniería Civil, por que siempre me reciben con una sonrisa y hacen que nuestro trabajo en la División sea más agradable.

A el Biól. Daniel Gleason Galicia

Por que creyó en mí y me dejo dar clases por primera vez en la Prepa 8 y puedo decirle me ha dejado una gran formación, creyó en mi capacidad de ser maestra y no lo defraudare.

A el L.A.E. Alexandro Aldape Barrios

Por que me ha dado la oportunidad de conocer la educación Marista que es lo más maravilloso que puede existir para un maestro, gracias por brindarme su apoyo en todo momento para hacer crecer mi vocación, muchas gracias.

A el Centro Universitario México

Que me abrió las puertas en el momento justo, solo Dios sabe por que pasan las cosas, pero suceden, gracias por que conocí a San Marcelino y por que ahí he encontrado a muchas personas que siempre tendrán una palabra de animo, alegría, apoyo y muchas cosas para compartir, todos están en mi corazón por que ya forman parte de mi vida, gracias .

A mis amigos:

Tadeo, Magali, Ricardo, Fabián, Juan y Raúl

Por que se que siempre estamos aunque no nos veamos.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
1 GENERALIDADES DE LA PRESA.	3
1.1 Ubicación	3
1.2 Geología de la boquilla	6
1.3 Descripción general de la cortina	8
1.4 Instrumentación	10
1.5 Sismicidad	14
1.6 Sismos registrados en la cortina	18
2 METODO DE ANALISIS	23
2.1 Transformada de <i>Fourier</i>	23
2.2 Espectro de Respuesta	26
2.3 Función de Transferencia	27
2.4 Angulo de fase	28
2.5 Función de Coherencia	29
2.6 Metodología	30
3. COMPORTAMIENTO DINAMICO	35
3.1 Efecto de los sismos sobre la cortina	35
3.2 Característica de vibración de la cortina	46
3.2.1 Espectros de Respuesta	47
3.2.2 Funciones de Transferencia	50
3.2.3 Funciones de coherencia	54
3.2.4 Ángulos de fase	61
CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	71

INTRODUCCIÓN

Las presas son obras sumamente importantes para el progreso del país, estas son estructuras que crean un lago artificial o derivan un río a cota prefijada con el objeto de almacenar o captar los escurrimientos, regar tierras o generar energía o bien dotar de agua potable a poblaciones o centros industriales, también sirven para regularizar el flujo de una corriente que provoca inundaciones en predios o poblados.

Los componentes que conforman un aprovechamiento hidráulico superficial son los siguientes:

- Área de captación o cuenca fluvial.
- Almacenamiento o presa, seleccionado de acuerdo con la demanda o fin predestinado de la obra.
- Derivación
- Sistema de conducción
- Sistema de distribución
- Utilización directa
- Eliminación de volúmenes

Una presa es un almacenamiento que debe estar conformado por: el vaso, la cortina, la obra de excedencia, la obra de desvío, y la obra de toma, de tal forma que cada uno cumple con una función particular y todos funcionan en conjunto.

Dada la importancia de la presa y principalmente de la cortina en este trabajo se hace el estudio del comportamiento dinámico de dicha estructura, sin olvidar que se debe hacer una evaluación de su seguridad periódicamente, a las otras estructuras igualmente importantes.

Durante el diseño de la cortina el principal desafío fue el disminuir la interacción entre el núcleo, las laderas y los respaldos, eliminando así el riesgo de fracturamiento hidráulico. En la construcción, la instrumentación geotécnica permitió evaluar el beneficio de utilizar las bandas de arcilla húmeda para evitar la interacción entre las laderas, el núcleo y los respaldos. La verificación del adecuado comportamiento fue a través de la medición de asentamientos, desplazamientos y esfuerzos efectivos.

En este trabajo se presenta el comportamiento dinámico de la presa Chicoasén, a partir del análisis de la información obtenida de la instrumentación sísmica instalada.

En el Capítulo 1. se mencionara las generalidades de la presa, en las que se incluyen la ubicación la geología de la boquilla, la instrumentación, la sismicidad en la zona y la estadística sísmica.

En el Capítulo 2. se desarrolla el método de análisis utilizado para estudiar las características de vibración de la cortina tales como los espectros de respuesta, la función de transferencia, el ángulo de fase y funciones de coherencia.

El análisis de la información manipulada con las técnicas descritas en el capítulo 2 se presenta en el capítulo 3, por último en el capítulo 4 se describen las conclusiones relacionadas a las características de vibración de la cortina.

1 GENERALIDADES DE LA PRESA.

1.1 Ubicación

La presa se localiza en las coordenadas geográficas 16° 93' de latitud norte y 93° 10' de longitud oeste, a 42 km al noreste de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chis. (fig. 1.1). Fue construida de 1977 a 1980 sobre el río Grijalva a 80 km aguas abajo de la presa La Angostura y a 55 km aguas arriba de la presa Malpaso.



Fig. 1.1 Localización de la presa Manuel Moreno Torres, Chicoasén.

La presa Manuel Moreno Torres "Chicoasén" (7) se ubica al final del Cañón del sumidero, entre las poblaciones de Osumacinta y Chicoasén ambas en la margen derecha del río Grijalva, e izquierda de los ríos Hondo y Bombána (fig. 1.2).

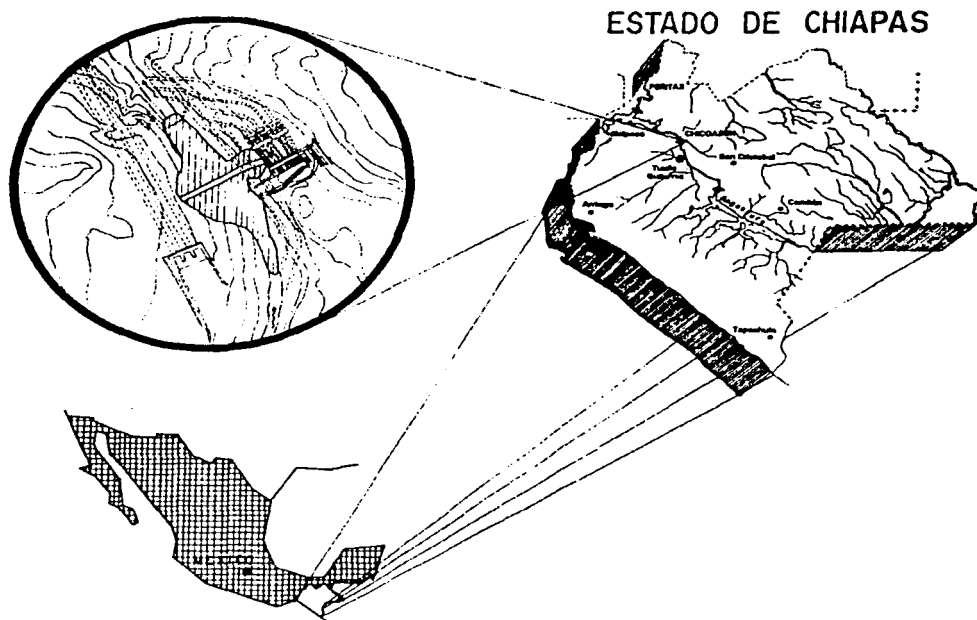


Fig. 1.2 Detalle de la localización de la presa Manuel Moreno Torres, Chicoasén.

La dirección general de las sierras es de Oeste-Norte-Oeste – Este-Sur-Este, y las fallas siguen aproximadamente, esta dirección. El relieve máximo de la región es de unos 1300m y el relieve promedio es de unos 600m. El río Grijalva y su principal afluente en esta región, el río Hondo, junto con los demás miembros de su cuenca hidrográfica, esculpieron la topografía que se observa. El rasgo fisiográfico más destacado de la región lo constituye el Cañón del Sumidero del río Grijalva, cortando en calizas cretácicas y que tienen profundidad de 1200 m.

Una obra de tal importancia es el resultado de un estudio general, en el que intervienen las características del río, la geología de la región, la existencia de lugares apropiados para crear embalse y cimentar la estructura, de tierras de labor o necesidad de energía en la región, o bien de poblaciones que proteger o dotar de agua.

En la tabla 1.1 se concentran los datos técnicos de proyecto de la Central hidroeléctrica de Chicoasén

HIDROLOGIA	
Área de la cuenca	26030 km ²
Escorrentamiento medio anual	11883X10 ⁶ m ³
Caudal medio anual	376.80 m ³ /s
Avenida máxima registrada	6214 m ³ /s
EMBALSE	
Capacidad total al NAME	1680X10 ⁶ m ³
Capacidad útil	285X10 ⁶ m ³
Capacidad control de avenidas	490X10 ⁶ m ³
Área máxima de embalse	3000 ha
Nivel máximo de embalse	395 m
Nivel normal NAMO	392 m
Nivel mínimo	380 m
POTENCIA Y GENERACIÓN	
Capacidad instalada	2400 MW
Generación media anual	5580 GWH
CORTINA	
Tipo: Enrocamiento	
Altura máxima	261 m
Elevación de la corona	402 m
Ancho de la corona	25 m
Longitud de la corona	584 m
Bordo libre	10 m
VERTEDOR	
Longitud total de la cresta	75.60 m
Elevación de la cresta	373.00m
Avenida de diseño	17400 m ³ /s
Capacidad máxima de descarga	15000 m ³ /s
OBRA DE TOMA	
Número	8
Caudal de diseño	1512 m ³ /s
CASA DE MAQUINAS	
Tipo: Subterránea	
Turbinas	8 Francis
Carga neta de diseño	180 m
Caudal de diseño	189 m ³ /s
Potencia de diseño	416000 CV
Carga bruta máxima	189 m
Carga bruta mínima	168.85 m
Velocidad	163.64 rpm
ALTERNADORES	
Capacidad	315790 KVA
Frecuencia	60Hz
Factor de potencia	0.95 cos Φ

Tabla 1.1 Datos técnicos

La Central hidroeléctrica se localiza en la margen derecha de la cortina y consta de obra de toma, conducción a presión, casa de máquinas subterránea, galería de transformadores, fosos de oscilación, túneles de desfogue y subestación (fig. 1.3). La caverna de la casa de máquinas tiene 220 m de largo por 27 m de ancho, con una altura máxima de 50 m. La planta de generación cuenta actualmente con una capacidad instalada de 1500 MW en 5 unidades de 300 MW cada una; la capacidad del vaso es de $1705 \times 10^6 \text{ m}^3$ y la capacidad de descarga del vertedor es de 15000 m^3/s .

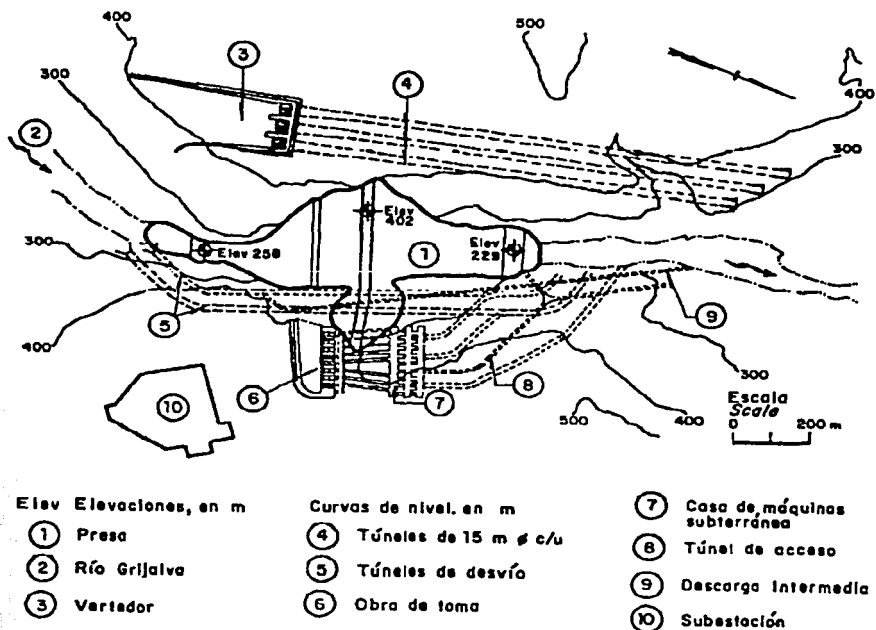


Fig. 1.3 Ubicación de las estructuras que conforman la Central Hidroeléctrica Manuel Moreno Torres, Chicoasén.

1.2 Geología de la boquilla

Las rocas que afloran en el cañón de Chicoasén son de origen sedimentario y representan en forma incompleta tanto del Cretácico Superior como el Terciario. La secuencia estratigráfica que aflora en el cañón se dividió en tres unidades litológicas que conforman la secuencia "Caliza Angostura" (fig. 1.4).

La secuencia litológica comprendida entre estas unidades esta inclinada dentro del cañón desde la margen derecha, con ángulos que varían de 4° a 24°. La inclinación es mayor en la parte meridional del cañón, es poca en la parte media y muy pronunciada a su salida.

A esta secuencia sobreyacen con contacto discordante lutitas, areniscas y brechas calcáreas del Terciario.

La Unidad 1 constituye la parte superior de la secuencia y está formada por calizas interestratificadas con capa de arcilla y lutita, de espesores variables de 90 a 140 m.

La Unidad 2 subyace concordantemente a la Unidad 1, consiste de caliza masiva, de color blanco y de textura arenosa, en bancos de más de 30 m de espesor y con un total de 120 m.

La Unidad 3 subyace a la Unidad 2 existiendo entre ambas un contacto erosional. Aflora en la parte central del cañón, donde constituye la parte más baja de la secuencia estratigráfica. Consiste de calizas gris oscuras, que están interestratificadas con arcilla carbonosa. Esta unidad tiene un espesor de 70 m.

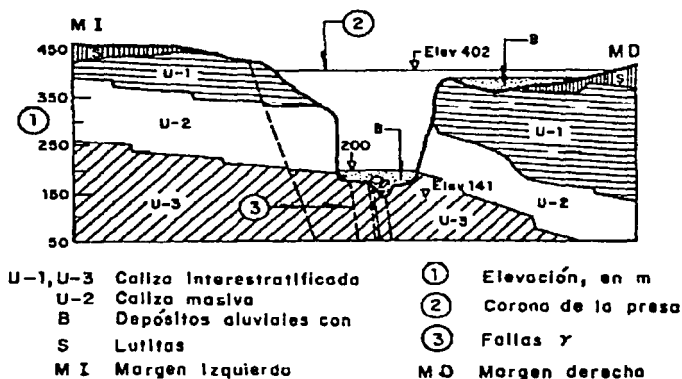


Fig. 1.4 Geología de la boquilla

La estructura actual del cañón es el resultado de plegamientos de dos etapas de fallamiento en bloques y de flexión. El cañón en si forma parte del flanco oriental del Anticlinal de Chicoasén, cuyo eje sigue un rumbo de N 80° W y es resultado de la primera época de plegamiento que afectó la región (fig. 1.5). En el norte este anticlinal está truncado por la falla de Chicoasén-Malpaso, sobrepuestas a esta estructura se presentan anticlinales y sinclinales menores, todos formados durante la primera época de plegamientos, y otros desarrollados durante una segunda deformación cuyos ejes tienen una orientación de N-S, se observaron además

terrazas estructurales a diferentes niveles.

El sitio elegido para la construcción de la cortina fue seleccionado por que la boquilla en este sitio era más ancha debido a que los bloques afectados por las fracturas gamma ya habían sido erosionados y acarreados por el río, permitiendo que las paredes de la boquilla estén formadas por superficies frescas poco alteradas, estables. En este sitio las calizas masivas de la Unidad 2 se presentan en ambos márgenes del río en el mayor espesor a todo lo largo del cañón, rocas que mecánica y estructuralmente son las mejores para dicha construcción.

El sitio fue explorado por cinco socavones en la margen izquierda y por tres en la margen derecha, con una longitud total de 750 m. Las condiciones geológicas encontradas fueron favorables para la construcción de una cortina de materiales graduados.

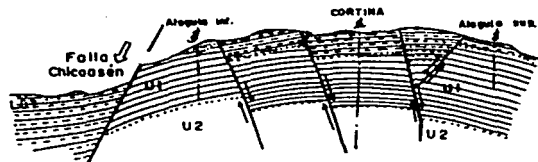
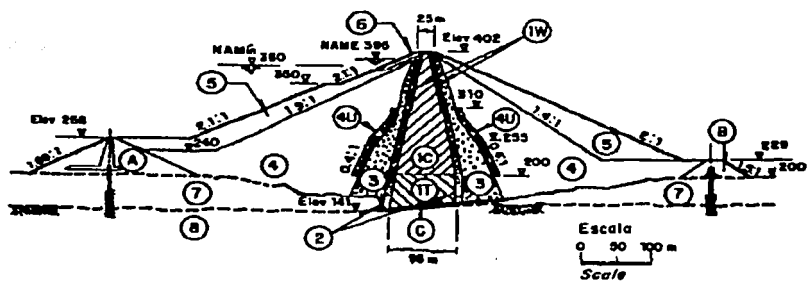


Fig. 1.5 Fallas escalonadas provocadas por la falla Chicoasén-Malpasso

1.3 Descripción general de la cortina

La cortina es la estructura principal de las obras de contención y del proyecto, siendo la estructura esencial por medio de la cual sólo se puede lograr la captación y almacenamiento (mediante un plano de estanqueidad) y por consiguiente una cierta carga hidráulica y gastos requeridos por las obras de generación, transformándose la energía potencial en energía mecánica en las unidades generadoras para producir finalmente la energía eléctrica.

La cortina es del tipo de enrocamiento núcleo impermeable que cuenta con zonas de permeabilidad creciente de centro hacia los taludes. La cortina tiene una altura de 261 m, la corona ubicada a la elevación 402 m tiene una longitud de 584 m y cuenta con taludes exteriores 2.1:1 y 2:1 (fig. 1.6). Debido a la geometría de la boquilla y como resultado de análisis numéricos y mediciones instrumentales durante la construcción de los primeros metros de terraplén, el diseño de la cortina sufrió modificaciones para disminuir el arqueo en el núcleo.



- | | |
|--|--|
| (A) Ataguá aguas arriba | (B) Ataguá aguas abajo |
| (1) Núcleo impermeable (1T, material de Tejería; 1C, material de La Costilla; 1W, material de La Costilla arriba del óptimo) | (C) Losa de concreto |
| (2) Filtros | (3) Zonas de transición |
| (4) Enrocamiento compactado (bien graduado) | (4U) Enrocamiento uniforme (15 < d _n < 25 cm) |
| (6) Enrocamiento seleccionado (protección contra el oleaje) | (5) Enrocamiento a volteo |
| (8) Caliza (U-3) | (7) Aluvión |
- NAME Nivel de aguas máximas extraordinarias
 Elev Elevación, en m
 NAMín Nivel mínimo

Fig. 1.6 Sección máxima transversal de la presa Chicoasén

La cortina queda localizada en un cañón angosto labrado en calizas y de topografía compleja, este cañón se caracteriza, en su extremo inferior por una garganta estrecha rellena con aluviones que se eliminaron antes de iniciar la construcción de la presa de tierra y enrocamiento. Las laderas, en el sitio, son casi verticales hasta media altura y la margen izquierda presenta un cambio abrupto de pendiente en su parte superior. Como se puede observar en la figura 1.7

Para la construcción del corazón impermeable se emplearon 2.5 millones de m³ de un conglomerado arcilloso muy alterado y de suelos residuales y contaminados provenientes de una lutita intemperizada. Los filtros son de grava-arena y el material de transición es producto de la rezaga de las excavaciones necesarias en la obra. Por lo estrecho de la boquilla y para acelerar el tiempo de terminación de la cortina, se optó por emplear una combinación de plantas trituradoras y transportadoras de materiales para acercar el material al lugar de su colocación.

Entre los materiales utilizados para Chicoasén tenemos los siguientes; para el núcleo se utilizó un material clasificado como arena arcillosa (SC) con alto contenido de grava, obtenido de dos bancos de préstamo identificados como Tejería y La Costilla, la fracción fina de ambos suelos está formada por arcillas (CL) de baja plasticidad. Estos materiales fueron tratados para obtener la granulometría y contenido de agua requeridos.

Para los filtros se utilizó arena bien graduada (SW) , proveniente de depósitos aluviales para el de aguas arriba y producto de trituración y cribado para el de aguas abajo. Por otro lado, para las transiciones se utilizaron gravas producto de trituración y cribado y en menor proporción gravas de depósitos aluviales ambas con tamaño máximo de 15 cm. (GW a GP).

Los enrocamientos se construyeron con roca caliza de buena calidad proveniente de canteras para el enrocamiento compactado se utilizaron tamaños máximos entre 40 y 50 cm.

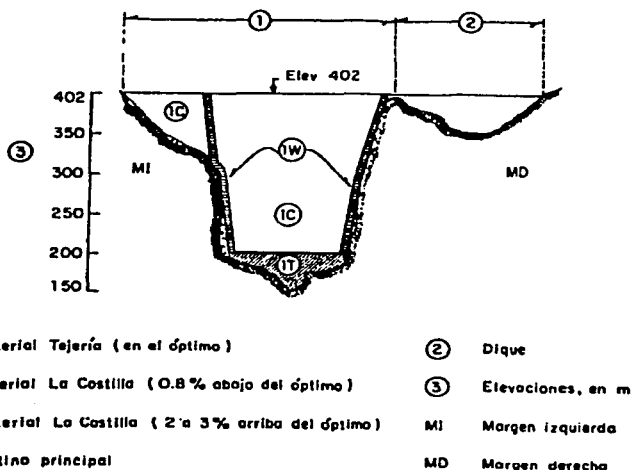


Fig. 1.7 Sección máxima longitudinal de la presa Chicoasén

1.4 Instrumentación

Las fallas de grandes presas han puesto de manifiesto los riesgos que pueden representar para la seguridad pública las grandes presas y la necesidad de someter estas obras a una vigilancia y control permanente y minucioso, aunque todas las presas representan un riesgo, como cualquier otra estructura hecha por el hombre la mayoría de las fallas pudieron haberse evitado o cuando menos previsto para minimizar las pérdidas, principalmente de vidas humanas, si se hubiera contado con un sistema de instrumentación adecuado observando sistemáticamente, con frecuencia y evaluando los resultados de inmediato para poder realizar acciones preventivas o correctivas de acuerdo con una estrategia preparada de antemano.

La mayoría de los incidentes de las presas de tierra y enrocamiento han ocurrido después de una falla previa. Tales fallas son generalmente procesos complejos que se han desarrollado en función del tiempo, emitiendo por adelantado señales de

advertencia que pueden detectarse mediante la instrumentación; por lo que se ha aceptado en la actualidad que la instrumentación forme parte del proceso constructivo de una presa.

Así la instalación de un sistema de instrumentación que permita el registro de anomalías que se desarrollen o tengan tendencia a desarrollarse tanto durante la construcción como durante la vida útil de la obra, este es el medio más eficiente para que el Ingeniero encargado vigile el comportamiento de una obra y evalúe su seguridad.

La instrumentación es toda una especialización de geotecnia y se requiere de tiempo así como practica para dominar todos los detalles involucrados en un proyecto.

- Conocer el comportamiento de la presa bajo las condiciones de carga normales o extraordinarias (Como los Sismos), con el fin de evaluar la seguridad
- Detectar oportunamente los problemas o deficiencias en el comportamiento de las estructuras térreas y sus cimentaciones durante la construcción y operación posterior, para corregirlas oportunamente.
- Obtener conocimientos que permitan mejorar el estado del arte en el diseño y construcción geotécnica, reduciendo costos sin demérito de las estructuras térreas y cimentaciones que se construyen en el futuro.

Las mediciones más comunes son: deformaciones y desplazamientos; presiones de poro o carga hidráulica y niveles freáticos; y esfuerzos.

La ocurrencia de un temblor en la vecindad de una presa puede causar daños importantes si su construcción no estuvo planeada con estudios sobre la geología y la sismotectónica del sitio las características y resistencia del material de construcción así como el comportamiento de la estructura antes y después del llenado del embalse.

La presa de Chicoasén esta afectada por la zona de subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana, esta es una región altamente sísmica y en esta zona han ocurrido los sismos mas importantes del país, y en ella encontramos también otras presas de gran importancia de México como: La Angostura, Peñitas y Malpaso en Chiapas, La Soledad y Temascal en la región de Oaxaca- Puebla, El Caracol, La Villita y El Infiernillo en Guerrero y Santa Rosa en Jalisco.

Generalmente una anomalía que pone en riesgo la integridad de una presa se refleja principalmente en el comportamiento hidráulico de la misma, el fenómeno de arqueado del núcleo no escapa a esta generalidad, por lo que se lleva acabo una revisión de los niveles de agua dentro de la cortina y se comparan con los valores teóricos, además se establece si existe o no una disminución del espesor del núcleo por agrietamiento. En la presa Chicoasén se instalaron más de 450 instrumentos para el

control de la presa, y varias líneas de mojoneras localizados en las secciones máximas longitudinales y transversales (fig 1.8).

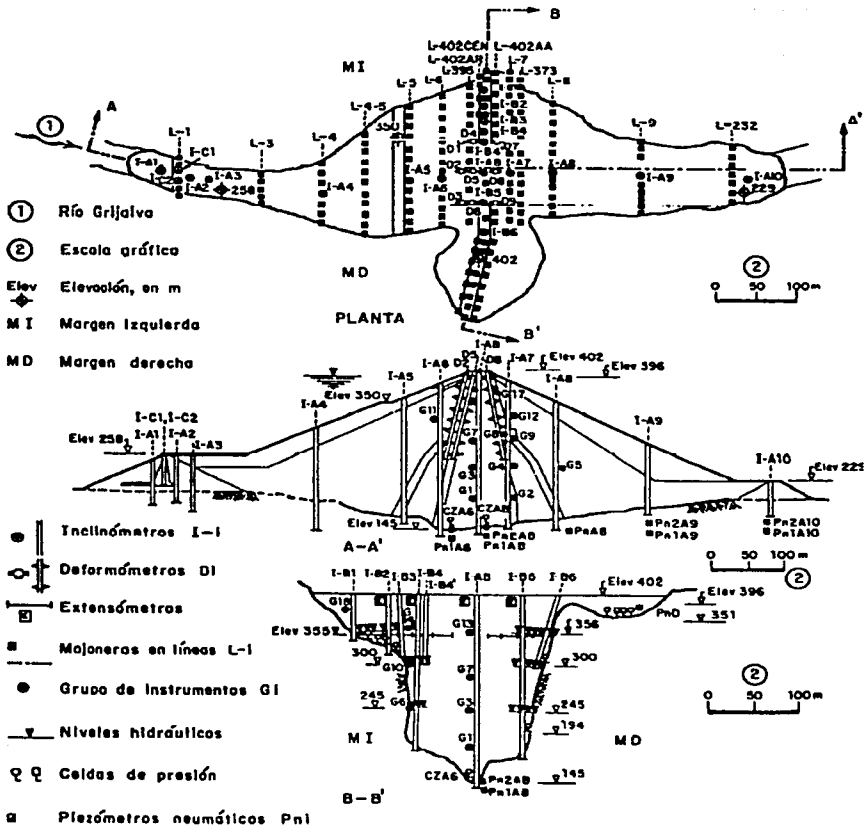
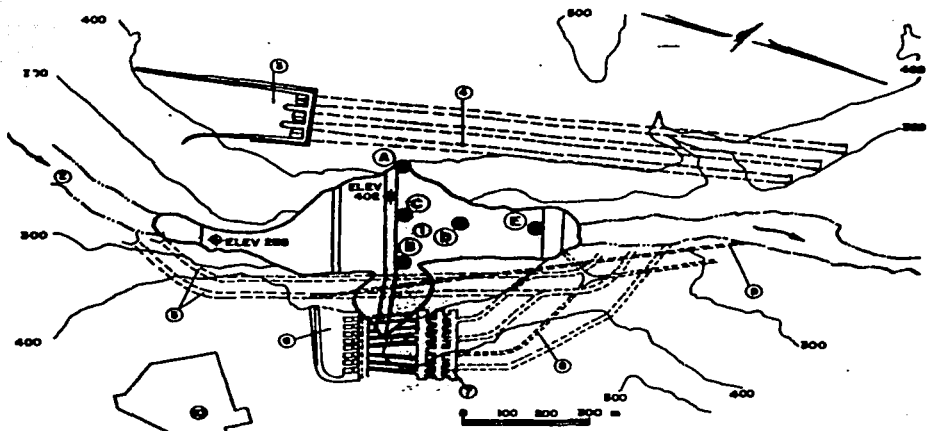


Fig. 1.8 Instrumentación instalada en la cortina

La instrumentación sísmica instalada en la cortina consta de 6 acelerógrafos, 3 instalados en el cuerpo de la cortina en las elevaciones 402 (CHIC, punto C en fig.1.9), 300 (CHIM, punto D en fig. 1.9) y 229 (CHIB, punto E en fig. 1.9) y tres en roca, uno en cada margen de la cortina (CHII punto A y CHID punto B de la fig. 1.9) y otro en el pueblo (CHSC) (Fig. 1.9).



ELEVACIONES, EN m

- | | |
|------------------------------|-----------------------|
| ① PRESA | ⑥ OBRA DE TOMA |
| ② RIO GRIJALVA | ⑦ CASA DE MAQUINAS |
| ③ VERTEDOR | ⑧ TUNEL DE ACCESO |
| ④ TUNELES DE 15 m ϕ c/u | ⑨ DESCARGA INTERMEDIA |
| ⑤ TUNELES DE DESVIO | ⑩ SUBESTACION |

● ESTACION ACELEROGRAFICA	
SIGLA	NOMBRE
A	CHII CHICOASEN MARGEN IZQUIERDA
B	CHID CHICOASEN MARGEN DERECHA
C	CHIC CHICOASEN CORONA CENTRO
D	CHIM CHICOASEN MEDIA CORTINA
E	CHIB CHICOASEN BASE CORTINA
F	CHCS CHICOASEN PUEBLO (no aparece en fig)

Fig. 1.9 Instrumentación sísmica en la cortina

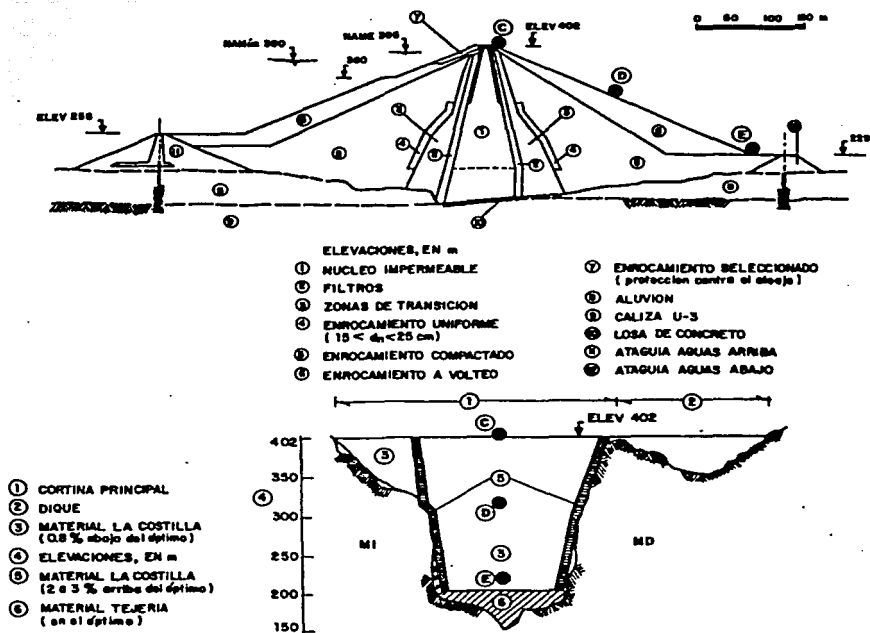


Fig. 1.9 Instrumentación sísmica en la cortina (continuación)

1.5 Sismicidad

El sismo es una sucesión de vibraciones de la corteza terrestre, las causas de estos pueden ser tectónicas, volcánicas, deslizamientos de taludes, meteoritos, explosiones, colapsos de cavernas, etc.

La presa Chicoasén está construida en una zona de gran actividad sísmica asociada a la subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana, en la que los sismos se presentan a profundidades focales mayores de los 60 km. Es importante indicar que en esta zona han ocurrido los sismos mas importantes del país. Sin embargo, se han generado sismos con epicentros muy cercanos a la presa cuyo origen obedece a la falla normal o inversa de la fracción de la placa de Cocos ubicada por debajo de la placa de Norteamérica, como es el caso del sismo de 1975 (temblor de Chiapa de Corzo, Ms = 4.3) con epicentro localizado a 35 km y con profundidad focal menor de 5 km.

Los análisis estadístico de datos de sismología instrumental existentes desde 1900 a la fecha, efectuado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), indican para la región la probabilidad sólo de una aceleración máxima de 0.15g con una recurrencia de 500 años.

El cañón del sumidero se encuentra en una zona de alta sismicidad en donde la mayor parte de la actividad sísmica se ha generado a profundidades de 100 Km o mayores. Sin embargo, existe información instrumental que atestigua la ocurrencia de temblores superficiales de magnitudes moderadas a poca distancia del sitio de la cortina, justificándose con ello la evaluación detallada del riesgo sísmico.

La investigación de campo con el objeto de estimar las magnitudes máximas probables que pueden generarse en las zonas vecinas al Cañón del Sumidero condujeron a lo siguiente:

Las características tectónicas de la zona hacen difícil pensar en magnitudes mayores que 6.5 en la vecindad de El Sumidero, aunque es perfectamente válido suponer temblores superficiales con magnitudes superiores a 8 a lo largo de la costa a 150 Km del sitio de la cortina.

Los resultados de riesgo sísmico nos indican que la mayor parte de los sismos superficiales de magnitud moderada y grande que han ocurrido en Chiapas o en su vecindad han tenido su epicentro en la costa o en el mar, mientras que la actividad correspondiente a temblores intermedios y profundos es casi uniforme en la plataforma marina y en la zona continental.

La evaluación del riesgo sísmico es una importante consideración de seguridad pública, a causa del gran volumen de agua que se maneja en este tipo de obras. Es necesario estar seguro de que la planta siga trabajando normalmente después del sismo y en el caso más crítico que permanezca en pie.

Debido a la presencia de grandes fallas en la cercanía del embalse, se ha tenido que estudiar la posibilidad de que sean activas o que se reactiven durante el llenado del embalse que podrían originar sismicidad que produjera aceleraciones altas en las obras.

Se han tomado en cuenta en la práctica los siguientes criterios para estudiar la sismicidad a lo largo de las fallas de Chicoasén.

a) GEOLÓGICO

Las fallas Chicoasén – Malpaso y Muñiz se hunden en capas de cenizas muy delgadas no disturbadas (rotas por las fallas) y que datan del Pleistoceno Medio (5 x 10⁶ años por el método Potasio – Argón). Por lo que se estima que las fallas han estado inactivas lo menos todo este período y concluyentemente inactivas para la obra.

Estudios de fotogeología y de campo, confirman que las fallas no son activas, las evidencias se estudiaron de la siguiente manera:

Se estudio y se marco el drenaje a lo largo de ambas caras de las fallas encontrándose que los arroyos cruzan perpendicularmente las fallas y no se observan desplazamientos de sus cauces, lo que nos indica que no existen desplazamientos horizontales por lo menos desde el tiempo de formación de la morfología actual.

No se observan terrazas a lo largo de ninguno de los bloques de fallas que nos puedan indicar que ha habido movimientos verticales en fechas recientes.

En la falla Cañada Muñiz se construyo el dique 2 de Malpaso aproximadamente en 1961 y fue instrumentado de tal manera que se pudiera determinar tanto movimientos horizontales como verticales de esta falla; hasta la fecha y a pesar de haberse llenado el embalse y haberse vaciado parcialmente varias veces no ha tenido ningún movimiento.

b) HISTORICO

De los datos recopilados en publicaciones y archivos históricos se obtuvo la siguiente delimitación:

Sismos de magnitud mayor de 6.5 de gran intensidad y foco poco profundo en la Planicie Costera del Pacífico.

Sismos de magnitud de 6 a 7.5 con intensidades de VIII y hasta X y de 80 a 100 Km. de profundidad en el valle central de Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, La Concordia, Ángel Albino Corzo, con destrucción total de un poblado ahora deshabitado y destrucción parcial del poblado de Venustiano Carranza.

Sismos de 5 a 6.5 de foco de 80 a 100 Km. de profundidad entre las poblaciones de Yajalón, San Cristóbal, y Comitán en la meseta Central con daños cada vez más fuertes hacia el oriente, teniéndose menor intensidad y sin daños cada vez más fuertes hacia el oriente.

En resumen, la distribución de sismicidad en Chiapas indica que la mayor concentración de epicentros se localiza en la porción sureste del Estado, en los límites con la Republica de Guatemala y frente a las costas del Pacífico, sin subestimar las regiones centro y noreste del estado donde han ocurrido movimientos importantes, pero con hipocentros más profundos (sismos de intraplaca) (fig. 10).

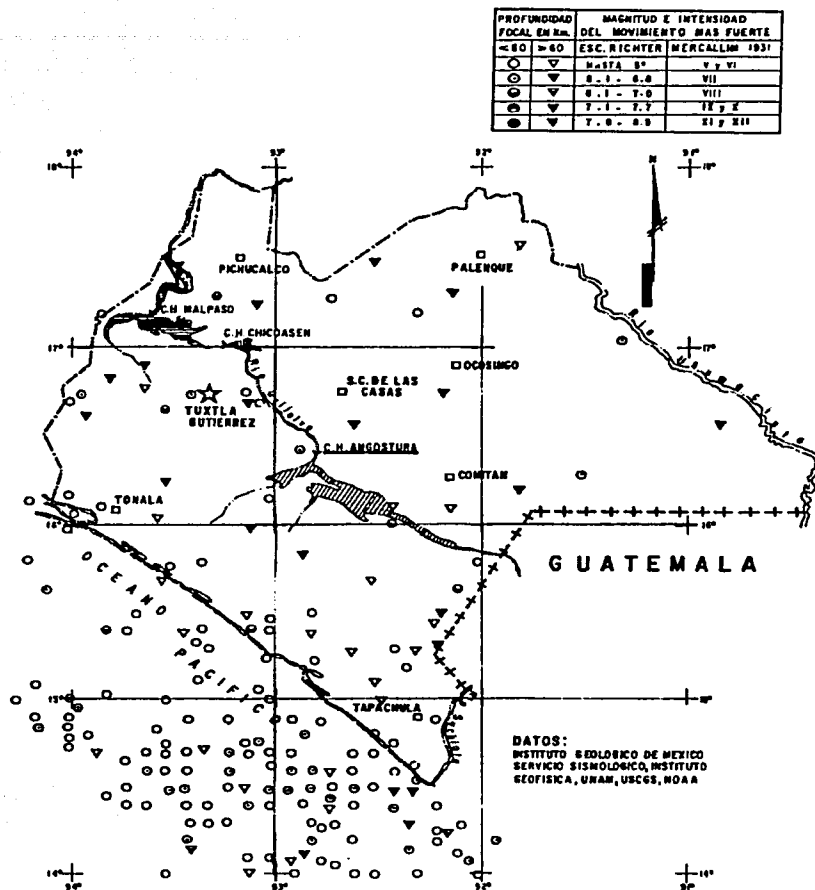


Fig. 1.10 Localización de los sismos

Como se mencionó, el origen de los sismos en el sureste fue tanto continental como marinos, frente a las costas de Chiapas y Oaxaca. En general, los primeros tuvieron su hipocentro a grandes profundidades originados principalmente en la llamada zona de Wadati-Benioff, mientras que los segundos presentan hipocentros que varían entre profundidad superficial a profunda, dependiendo de la región (más profundos

en la zona sureste de la costa chiapaneca y de Guatemala).

Es importante mencionar que la ubicación de los sismo está delimitada hacia el sur por las estructuras geológicas Polochic-Motagua definida entre las placas de Norteamérica y del Caribe, y zona de falla Salina Cruz (fig. 11).

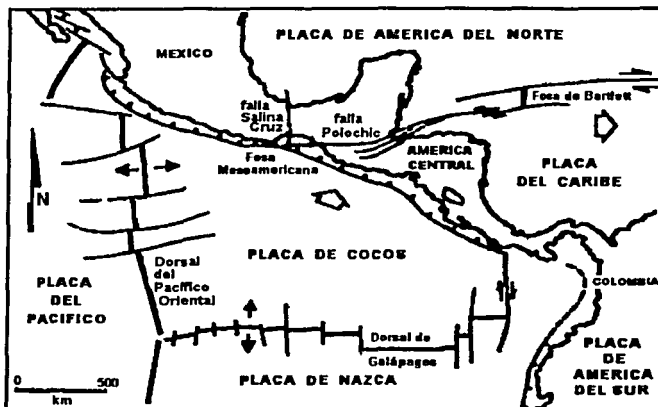


Fig. 1.11 Estructuras geológicas

1.6 Sismos registrados en la cortina

Desde la construcción, la presa Manuel Moreno Torres ha sido sometida a cargas dinámicas provocadas por eventos sísmicos de diferentes magnitudes y se han podido registrar más de 300 sismos de magnitudes mayores a 2 en el periodo comprendido entre 1975 y 2000. En la tabla 1.2 se aprecia que el mayor porcentaje de sismos corresponde a los eventos de magnitudes entre 4 y 5 (66%), el 25% a sismos de magnitud entre 5 y 6 grados y sólo el 9% a sismos de magnitud mayor que 6.

PRESA	Magnitud Richter		
	4.0 - 5.0	5.1 - 6.0	≥ 6.0
Manuel Moreno Torres "Chicoasén"	66	25	9

TABLA 1.2 Eventos sísmicos registrados

La localización de los epicentros de los sismos utilizados se presenta en la figura 1.12. En ésta se aprecia la ubicación de los sismos que han afectado a la cortina y

cuya localización se encuentra principalmente en los estados de Oaxaca y Chiapas y en su costas.

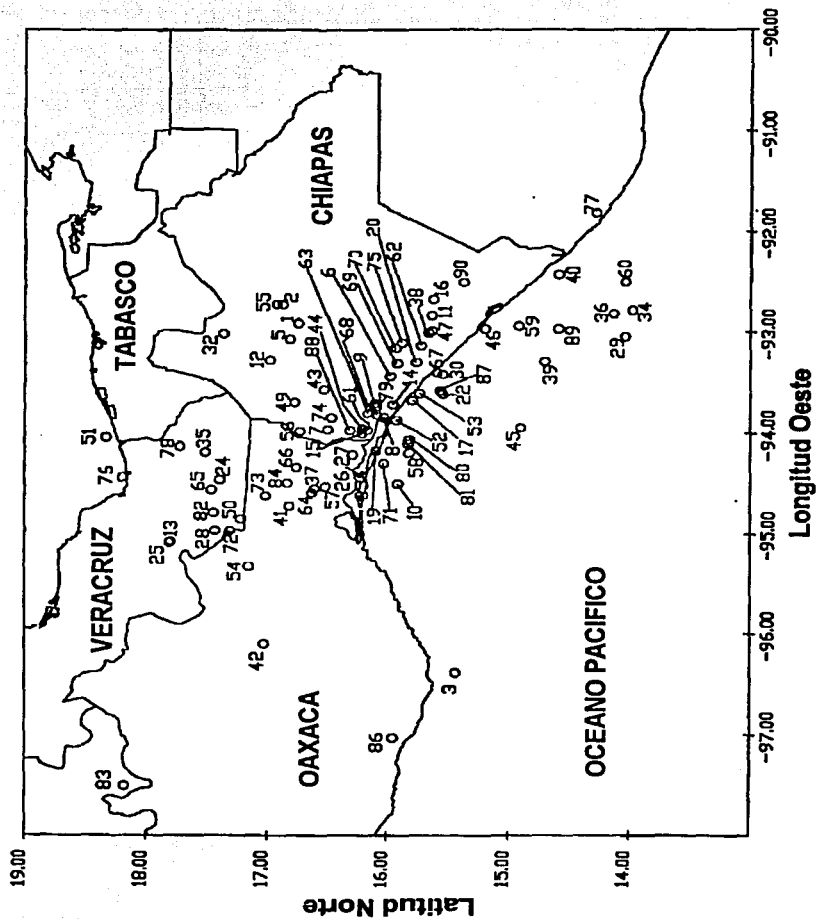


Fig. 1.12 Localización de los sismos utilizados

En la tabla 1.3 se concentran las características importantes de los sismos registrados por la instrumentación instalada en la cortina, con magnitud mayor a 2 grados en la escala de Richter.

Sismo	Evento	Fecha	Magnitud Richter	Profundidad Focal (km)	Distancia Epicentral (km)
1	1	6-Oct-75	Mb=4.80	-5	29
2	1	5-Nov-75	Mb=5.20	-5	41
3	1	14-Feb-81		-5	397
4	1	17-ene-83	Mb=4.50	-5	839
5	1	22-Jul-83		-5	14
6	1	15-Sep-83	Mb=5.70	12	113
7	1	18-Sep-83	Mb=5.20	14	107
8	1	3-Ago-84		8	130
9	1	31-Ago-84	Mb=5.30	6	114
10	1	7-Abr-86	Mb=5.80	-5	191
11	1	5-Jul-86	Mb=5.30	11	146
12	1	3-Ene-87	Mc=3.40	31	20
13	1	7-May-87		-5	236
14	1	4-Oct-87	Mb=5.30	-5	128
15	1	16-Sep-89	Mb=5.90 M=5.60	9	128
16	1	6-Dic-89	Mb=5.20 Ms=3.90 Mc=5.00	7	151
17	1	17-Jul-90	Mb=4.60 Mc=4.80	6	141
19	1	5-Oct-90	Mb=4.70 Mc=4.70	7	151
20	1	5-Nov-90	Mb=4.70 Mc=5.00	11	131
21	1	27-Ene-91			
22	2	4-Feb-91	Mb=4.90 Mc=5.00	-5	163
24	1	31-May-91	Mc=4.90	9	157
25	1	25-Jul-91	Mb=5.30 M=5.20	-5	238
26	1	30-Jul-91	Mc=4.60	-5	142
27	2	30-Jul-91	Mc=4.60	-5	142
28	1	20-Dic-91	Mc=4.90	12	211
29	1	30-May-92	Mc=5.50	19	320
30	1	26-Oct-92	Mc=4.70	9	157
31	1	11-Jun-93			
32	1	21-Jun-93	Mc=4.70	20	48

Tabla 1.3 Características de los sismos utilizados

Sismo	Evento	Fecha	Magnitud Richter	Profundidad Focal (km)	Distancia Epicentral (km)
34	1	3-Sep-93	Mb=5.80 Ms=6.80 Mc=6.50	69	329
35	1	6-Sep-93	Mc=4.30	56	135
36	1	10-Sep-93	Mb=6.30 Ms=7.30	14	311
37	1	12-Mar-94	Mb=5.10 Mc=5.00	73	163
38	1	14-Mar-94	M=6.50	95	140
39	1	25-Mar-94	Mb=5.00 Mc=5.00	40	248
40	1	10-Abr-94	M=5.50	5	270
41	1	27-Ago-94	Mb=4.70 Mc=5.00	115	178
42	1	28-Ago-94	Mb=5.40 M=5.20	22	328
43	1	14-Sep-94	Mb=4.40 Mc=4.80	70	69
44	1	18-Oct-94	Mb=4.30 Mc=4.60	90	124
45	1	31-Oct-94	Mb=5.10 Ms=4.80 Mc=5.10	10	244
46	1	16-Nov-94	Mc=4.90	74	192
47	1	30-Nov-94	Mb=4.50 Mc=4.90	114	144
48	1	17-Ene-95			
49	1	21-Oct-95	Mw=6.9 Me=6.5	120	68
50	1	7-Ene-96	Mc=4.7	103	194
51	1	18-Feb-96	Mc=4.3	90	186
52	1	02-may-96	Mc=4.7	53	141
53	1	15-Jul-96	Mc=4.5	57	143
54	1	12-Oct-96	Mc=4.5	121	245
55	1	19-Oct-96	Mc=4.5	124	100
56	2	19-Oct-96	Mc=4.8	5	41
57	3	19-Oct-96	Mc=4.7	45	163
58	1	11-Nov-96	Mc=4.6	19	172
59	1	17-Nov-96	Mc=4.7	62	223
60	1	5-Dic-96	Mc=5.2	14	327
61	1	19-Dic-96	Mc=4.4	83	129
62	1	31-Dic-96	Mc=5.6	166	133
63	1	1-Ene-97	Mc=4.4	93	116
64	2	1-Ene-97	Mc=4.7	40	167

Tabla 1.3 Características de los sismos utilizados (Continuación)

Sismo	Evento	Fecha	Magnitud Richter	Profundidad Focal (km)	Distancia Epicentral (km)
65	1	15-Ene-97	Mc=4.3	151	169
66	1	6-Feb-97	Mc=4.3	121	137
67	1	9-Feb-97	Mc=4.2	9	151
68	1	20-Feb-97	Mc=4.0	90	124
69	1	15-Mar-97	Mc=4.8	130	114
70	1	31-Mar-97	Mc=4.6	144	111
71	1	20-Abr-97	Mc=4.5	38	166
72	1	29-Abr-97	Mc=4.7	121	208
73	1	27-Jun-97	Mc=4.50	139	166
74	1	7-Ago-97	Mc=4.70	89	97
75	1	5-Sep-97	Mc=4.8	55	117
76	1	6-Sep-97	Mc=4.7	48	202
77	1	10-Ene-98	M=6.3	80	325
78	1	25-Abr-98	Mc=4.9	47	143
79	1	2-Jun-98	Mc=4.7	4	118
80	1	7-Jun-98	Mc=5.2	16	163
81	1	9-Jun-98	Mc=5.0	17	165
82	1	23-Dic-98	Mc=4.6	137	193
83	1	15-Jun-99	Me=7.0 Mb=6.4 Ms=6.5 Ma=6.3	69	500
84	1	29-Jul-99	Mc=4.7 Mb=5.0 Mb=4.6	108	153
85	1	14-Ago-99	Mc=4.7	74	166
86	1	30-Sep-99	Mb=6.5	16	445
87	1	11-Nov-99	Mc=4.5	55	160
88	1	12-Mar-00	Mc=4.5 Mc=4.2	98	119
89	2	12-Mar-00	Mc=5.4 Mb=5.5	35	260
90	1	17-Oct-00	Mc=5.4 Mb=5.5	168	184

Tabla 1.3 Características de los sismos utilizados (Continuación)

2 METODO DE ANALISIS

2.1 Transformada de *Fourier*

La Transformada de *Fourier* se aplica en el tratamiento de muchos problemas físicos, como por ejemplo en la teoría del sonido, conducción del calor, ondas electromagnéticas, circuitos eléctricos, y vibraciones mecánicas, etcétera, haciendo uso de un tipo particular de serie trigonométrica para representar una función $f(x)$, la transformada de *Fourier* es una invaluable herramienta en las aplicaciones en donde frecuentemente al buscar la solución de $f(x)$ esta se encuentra más fácilmente con su transformada $g(K)$, la solución $g(K)$ se invierte usando la antitransformada, que generalmente lleva a la solución de los problemas generados.

Una curva generada por una sucesión de puntos, que se puede considerar también como un tipo de onda, y que representa la transmisión de energía a través del tiempo, no se extiende infinitamente en el tiempo, esta onda está restringida a pulso y sus componentes de frecuencia deben cancelarse mutuamente en el limite del tiempo que tiende al infinito.

Para encontrar la frecuencia entre los senos y cosenos que componen la curva, *Fourier* desarrolló un método, utilizando la transformada de *Fourier*.

La transformada de *Fourier* transforma una función a partir de: **el dominio del tiempo a lo que se llama el dominio de las frecuencias**. Esto significa simplemente que se tiene una curva que se desarrolla sobre el tiempo, y se encuentran sus frecuencias. **El resultado se llama espectro**, el cual es una onda con sus frecuencias básicas.

Habiendo calculado la Transformada de *Fourier*, podemos representar la magnitud que corresponde a cada frecuencia (la intensidad) contra dicha frecuencia es decir contra cada dato. (definimos el eje de frecuencias de la transformada, multiplicando su frecuencia por el número de muestras por segundo)

Una vez que se conoce el contenido de frecuencias de una onda, podemos físicamente deshacernos de algunas de ellas esto para graficar el valor absoluto de la parte real del problema $f(t)$ ya que algunos resultados pueden ser complejos, así se puede ver un pico principal que corresponde a ciertos movimientos sísmicos. El movimiento de las ondas gobierna muchos fenómenos físicos, entre estos los sismos por lo que haremos un análisis espectral con esta técnica matemática.

Una función periódica puede ser descompuesta en sus componentes armónicas, mediante la transformación de la función al dominio de la frecuencia. Por lo que la suma de las componentes armónicas será la función periódica. Si $x(t)$ es una función periódica del tiempo t , con periodo T , tal como se muestra en la figura 2.1, siempre es posible expresar $x(t)$ como una serie infinita de términos trigonométricos.

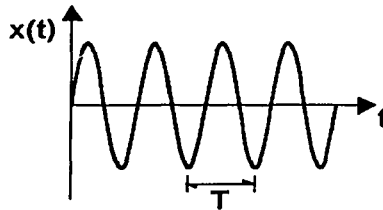


Fig. 2.1 Función periódica arbitraria del tiempo

La serie trigonométrica se expresa de la forma:

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

o simplificando la expresión:

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

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

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

2.2

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \quad k=1$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \text{sen} \frac{2\pi kt}{T} dt \quad k=1$$

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

Supóngase que se ajusta la altura del eje t de forma que el valor medio de $x(t)$ sea cero. Entonces el coeficiente a_k , y b_k serán, en general, diferentes entre sí.

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

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

que es la frecuencia del k -ésimo armónico, y el espacio entre armónicos adyacentes es:

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

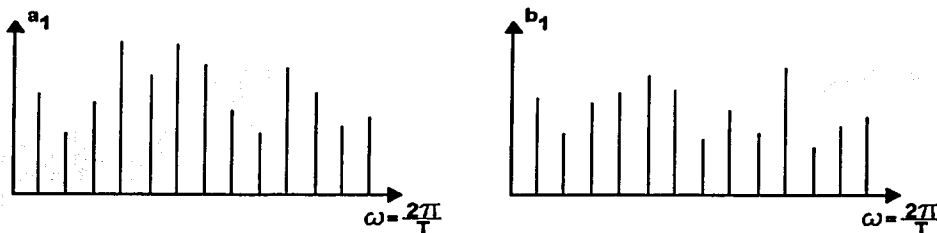


Fig. 2.2 Representación Gráfica de los Coeficientes de *Fourier*

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

Integral de *Fourier*

Sustituyendo la ecuación 2.2 en la ecuación 2.1 se obtiene para $a_0 = 0$

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

Sustituyendo $\frac{2\pi k}{T}$ y $f = \frac{1}{T}$ obtenidos de las ecuaciones 2.3 y 2.4 respectivamente 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 la sumatoria se convierte en una integral con limites $\omega = 0$ y $\omega = \infty$, y en tal caso:

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

Separando términos:

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

$$B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \operatorname{sen} \omega(t) dt \quad 2.5$$

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

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

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

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

2.2 Espectro de Respuesta

El concepto básico es el de la oscilación de una partícula en torno a un punto de equilibrio, debido a la acción combinada de inercia, de disipación de energía de almacenamiento de energía potencial y finalmente por las fuerzas excitadoras externas, este fenómeno se extiende al caso en el que se tienen varias partículas o al caso extremo de un medio continuo, en el que este número es infinito. Así que en estos casos es importante conocer la historia de los movimientos de cada partícula, lo cual conduce a variaciones en los desplazamientos.

El espectro de respuesta es el conjunto de valores máximos de aceleración, velocidad, y desplazamiento de estructuras de un grado de libertad con comportamiento elástico lineal del mismo amortiguamiento, sujeto al mismo amortiguamiento en su base, y podría definirse como: el lugar geométrico de los valores absolutos de las respuestas máximas de un sistema con un grado de libertad no amortiguado o con amortiguamiento viscoso pequeño y con una frecuencia natural que varía de cero a infinito, y sometido a un sismo determinado. Se observa que tiene relación con los valores extremos que ocurren en la respuesta.

Conocidos el espectro de potencia de la excitación que es la forma como se presenta el sismo, y la función de transferencia podemos obtener el espectro de respuesta utilizando la ecuación $P_r(w) = |H(w)|^2 P_x(w)$ y con esta podemos calcular la variancia de la respuesta N_r , utilizando la expresión

$$N_r^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H(w)|^2 P_x dw$$

$$N_r^2 = \int_0^{\infty} |H(w)|^2 P_x dw - 0.5w_0 P_x(w_0)$$

Donde:

$P_x(w)$ Espectro de potencia para los desplazamientos en el nodo j

$H_j(w)$ Función de transferencia compleja de los desplazamientos en el nodo j, con respecto a las aceleraciones en la base

$P(w)$ Espectro de potencia de la excitación en la base rígida.

y con esta podemos obtener el espectro de respuesta con la expresión:

$$S_a(w) = 3 N_r$$

Donde 3 es el parámetro de *Venmarcke*, quien encontró que los picos de una función aleatoria $f(t)$ ocurre en grupos, cuyo tamaño depende de un factor empírico q .

2.3 Función de Transferencia

La función de transferencia $H(\omega)$ de un sistema en un estado estable, con características dinámicas es la respuesta del sistema a la entrada de una vibración, midiendo de manera aproximada la respuesta transitoria inicial y final para la alteración del mismos, 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:

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

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

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) dt = I \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = I$$

en (Fuerza) por (Tiempo)

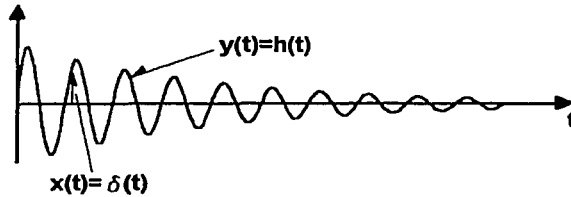


Fig. 2.3 Función de Transferencia

La terminología anterior 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 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 $h(t)$ (fig. 2.3). Haciendo notar que cuando $h(t) = 0$ para $t < 0$ entonces $y(t) = 0$ es decir antes de que ocurra la vibración o el impulso.

2.4 Angulo de fase

La transmisión de ondas sísmicas desde su fuente hasta la estación de registro, puede estudiarse como un proceso de propagación de ondas elásticas de diversos tipos (compresión, cortante, superficiales). Durante este proceso ocurren fenómenos tales como la reflexión, refracción, atenuación, ampliación del frente de onda, etc. La influencia del suelo local tiene lugar al final de dicho proceso. La respuesta sísmica del suelo puede diferir de un punto a otro ubicado en la misma región o de uno ubicado a diferentes profundidades medidas desde la superficie del terreno.

Al fenómeno de modificación de la respuesta dinámica del suelo cuando este se encuentra en condiciones estables (que no se presente el fenómeno de licuación, que no haya compactación por vibración, pérdida al esfuerzo cortante, etc.), se le llama amplificación o atenuación, esta condición implica modificaciones en la respuesta sísmica bajo determinada condición local del suelo es decir puede haber,

modificación en la amplitud de la respuesta (aceleración, velocidad, desplazamientos, etc.), o modificación en el contenido de frecuencias (respuesta evolutiva en el dominio de la frecuencia).

La disipación de energía durante cada ciclo de carga y descarga de un elemento de suelo se manifiesta de muy diversas maneras, por ejemplo: en la alimentación de energía necesaria para mantener constante la amplitud de vibración forzada, en la amplitud finita de vibración en resonancia, o en el decremento progresivo de la amplitud de vibración simple. Cualquiera de esas manifestaciones del amortiguamiento interno proporciona a su vez una medida de este y un método para su cuantificación.

El amortiguamiento interno también puede medirse mediante el ángulo de fase α , entre la fuerza y la deformación en vibración forzada. En efecto, durante la vibración forzada de un elemento perfectamente elástico la fuerza actuante y la deformación de respuesta están en fase, es decir ambas alcanzan valores máximos simultáneamente, pues son proporcionales; esto implica que el trabajo realizado es nulo, ya que el vector de velocidad resulta normal al vector de fuerza. Por otra parte en un sistema viscoso ideal la velocidad de deformación es la que está en fase con la fuerza y, puesto que en vibración periódica la deformación y la velocidad de deformación están desfasadas $\frac{\pi}{2}$,

Hay un retraso de $\frac{\pi}{2}$, de la deformación con respecto a la fuerza, por lo que la energía disipada es máxima. En general, si hay tanta disipación como almacenamiento de energía, como en un material viscoelástico, la deformación sufre un retraso entre 0 y $\frac{\pi}{2}$ con respecto a la fuerza, y una componente de la velocidad de deformación tiene la misma dirección que la fuerza.

En resumen 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 establecerse por:

$$\tau = \frac{\phi_{xy}(f)}{2\pi f}$$

2.5 Función de Coherencia

El término $\gamma_{xy}^2(f)$ es llamado la función de coherencia, cuando $\gamma_{xy}^2(f) = 0$ para una frecuencia en particular $x(t)$ y $y(t)$ son llamadas incoherentes, para dicha frecuencia en cuyo caso no existe una correlación. Si $x(t)$ y $y(t)$ son estáticamente

independientes cuando $\gamma_{xy}^2 \neq 0$ para todas las frecuencias.

Cuando $\gamma_{xy}^2 = 1$, para toda f , entonces $x(t)$ y $y(t)$, se dice que son completamente coherentes (dependientes).

2.6 Metodología

Método de Vibraciones aleatorias

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

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

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

De la función de autocorrelación se obtienen un valor real para cualquier τ de desfaseamiento del proceso, y se 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 en una ecuación similar a la anterior.

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

De igual manera esta ecuación 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:

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

De la función de autocorrelación se obtiene un real para cualquier $\tau \neq 0$ de desfaseamiento entre los procesos y presenta un máximo para un desplazamiento en el tiempo τ . Con esta función se pueden determinar: el tiempo que la señal necesita para atravesar un medio continuo dado y las trayectorias de propagación de la señal, entre otras.

En un experimento el ruido producido por una bocina es captado por dos micrófonos (fig. 2.4). Se considera que el primero capta la señal tal cual es producida por la bocina, y el segundo la señal después de que atravesó un medio continuo. En la 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 variaciones del experimento consistieron en captar la señal con los dos micrófonos:

- a) Sin superficies que capturen la señal que refractan 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

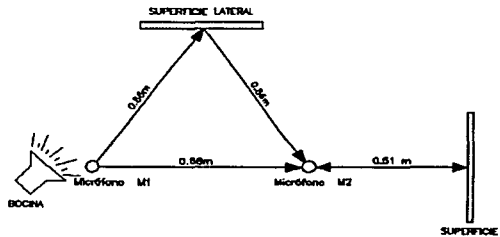


Fig. 2.4 Experimento acústico

Las correlaciones cruzadas entre los dos micrófonos, calculadas para las cuatro variantes del experimento acústico, son dibujadas en la figura 2.5 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 (0.68m) es de 2ms, este está representado por la posición del pico en la función de correlación cruzada. Si existe una superficie reflejante, lateral y equidistante a los dos micrófonos, la señal tarda 3.9ms en recorrer 1.32m (Fig. 2.5b). 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 (1.70m) es de 5ms (Fig. 2.5c).

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 (Fig. 2.5d). 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.

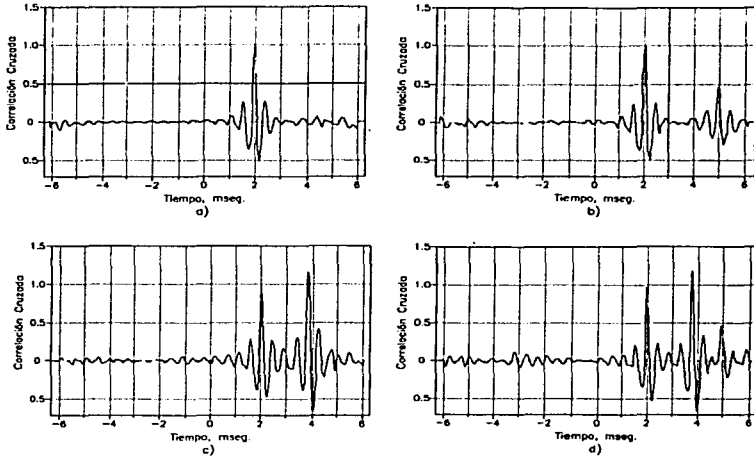


Fig. 2.5 Correlaciones cruzadas del experimento acústico

Al aplicar la transformada de *Fourier* a las funciones de autocorrelación de entrada 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

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

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:

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

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

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

La función de transferencia entre la excitación y la respuesta se puede calcular mediante la siguiente expresión:

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

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

$$G_{xy}(f) = |G_{xy}(f)| e^{-j\theta_{xy}(f)}$$

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:

$$|G_{xy}(f)| = \sqrt{C_{xy}^2(f) + Q_{xy}^2(f)}$$

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \left[\frac{Q_{xy}(f)}{C_{xy}(f)} \right]$$

donde la función $\theta_{xy}(f)$ es llamada ángulo de fase. Como ejemplo del significado físico del ángulo de fase, en la figura 2.6 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.

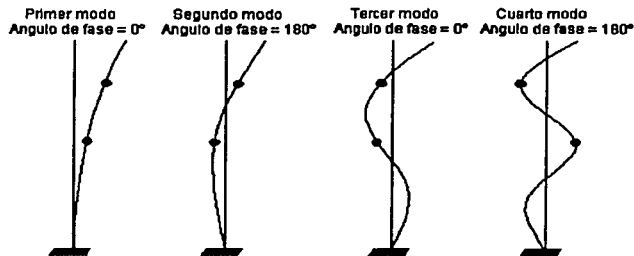


Fig. 2.6 Primeros cuatro modos de vibrar de una estructura en cantiliver

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

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

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

En la figura 2.7 se presenta las gráficas del ángulo de fase y función de coherencia del experimento acústico. En la figura 2.7 se observa que la forma de la curva tiene variaciones lineales entre los valores positivos y negativos del ángulo de fase máximo igual a 180° , y curvas lineales e igual a uno en las funciones de coherencia cuando la señal tiene una única ruta de propagación (Fig. 2.7a). En la figura 2.7b se muestran las curvas de ángulos de fase y función de coherencia cuando existen diferentes rutas de propagación.

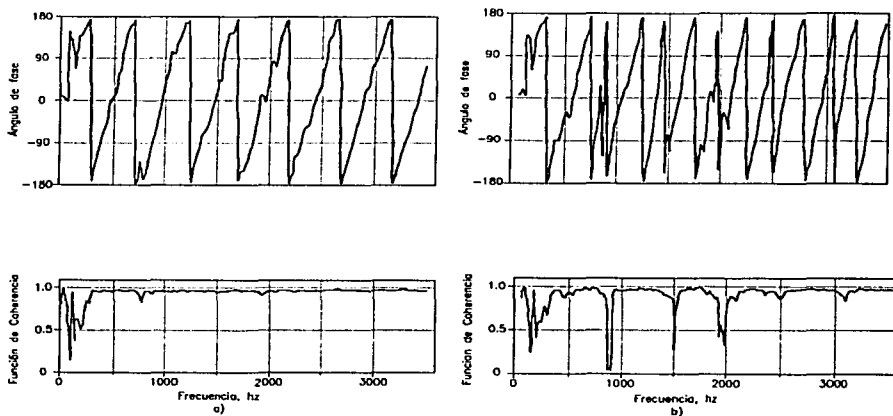


Fig. 2.7 Ángulo de fase y función de coherencia del experimento acústico

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

3. COMPORTAMIENTO DINAMICO

3.1 Efecto de los sismos sobre la cortina

Durante un sismo, la base de las construcciones siguen el movimiento del terreno sobre el que se apoya. Debido a la inercia y a la flexibilidad de la construcción es más fácil para las partes superiores mantener su estado de reposo inicial. Esto ocasiona que mientras la base es obligada a seguir la oscilación de terreno, las partes superiores obedecen más a la inercia que al movimiento de niveles inferiores. Así, para que estos desplazamientos relativos ocurran, la estructura debe deformarse para mantener su integridad. Resulta muy interesante observar que la ocurrencia de un sismo impone a la estructura deformaciones, no fuerzas. Una vez terminado el movimiento en la base la parte superior sigue deformándose.

La respuesta sísmica de una estructura no solo depende de ella misma sino también del tipo de movimiento de su base; este último depende principalmente del carácter del sismo, de la distancia del epicentral y del suelo sobre el que se apoya.

A partir de los daños observados en presas y terraplenes, inducidos por sismo, se puede inferir que los principales mecanismos de falla son: deslizamiento y distorsión por cortante, agrietamiento longitudinal y transversal, ruptura de conductos subterráneos, corte por desplazamiento de fallas geológicas, oscilaciones del embalse de periodo largo y oleaje generado por deslizamientos del vaso y asentamiento de la cimentación.

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

La mayor parte del agrietamiento longitudinal y transversal de terraplenes durante sismos, puede atribuirse a los asentamientos que a su vez son función de la distorsión por cortante del terraplén (deformaciones angulares). Por lo tanto los modos de falla por agrietamiento no deben considerarse como modos de falla independientes, sino como consecuencia del modo de deformación por cortante (Fig. 3.1)

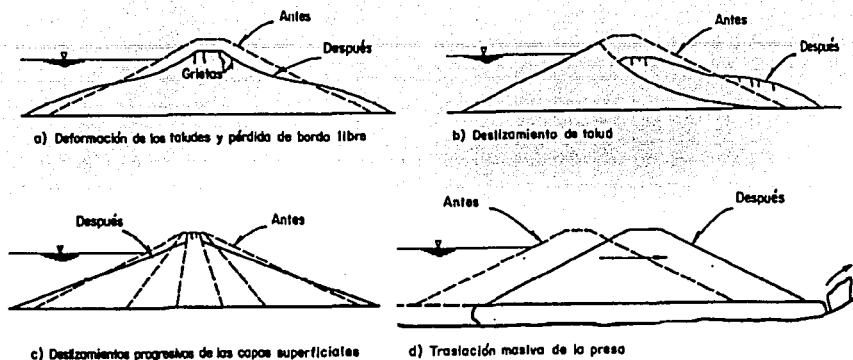


Fig. 3.1 Daños inducidos por deformaciones por cortante

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

Se puede esperar que las presas de enrocamiento, bien diseñadas, desplantadas sobre cimentaciones densas, no presenten deslizamientos masivos durante sismos. Sin embargo, aún las presas bien diseñadas pueden sufrir distorsiones provocadas por un fuerte temblor. La principal consecuencia de ésta es la pérdida de bordo libre o asentamiento de la corona, el desarrollo de grietas en zonas del terraplén donde el patrón de distorsión induce deformaciones por extensión, la presión confinante es relativamente baja además, la altura de la sección transversal máxima en la mayoría de las presas varía a lo largo del eje del terraplén por lo que se pueden presentar asentamientos diferenciales en la corona, los que a su vez inducen extensión longitudinal y grietas en los extremos de la corona. La intensidad de la distorsión por cortante y la magnitud de la consecuente pérdida de bordo libre y agrietamiento dependen de las características de la presa, de las propiedades de los materiales que la conforman y del sismo, pudiendo alcanzar proporciones catastróficas bajo sismos muy fuertes.

En el capítulo 1 se mencionó que la distribución de sismicidad en Chiapas indica que la mayor concentración de epicentros se localiza en la porción sureste del estado, en los límites con la República de Guatemala Y frente a las costas del Pacífico, sin subestimar las regiones centro y noreste del estado donde han ocurrido movimientos importantes, pero con hipocentros más profundos. La mayor magnitud estimada ($M=7.8^{\circ}$) corresponde al macrosismo ocurrido el 23 de septiembre de 1902

Bajo esta situación es importante evaluar el comportamiento sísmico de terraplenes como el de la presa Manuel Moreno Torres Chicoasén que ha sido sometida a cargas dinámicas provocadas por eventos sísmicos de diferentes magnitudes.

Debido a factores tales como: sensibilidad, nivel de disparo, distancia epicentral de los sismos, energía y trayectoria de los mismo, no fue posible obtener por cada sismo registrado los acelerogramas de la red completa, por lo que con la instrumentación sísmica instalada en la presa se han registrado hasta octubre del año 2000 un total de 90 sismos con magnitud mayores de 2 grados *Richter*.

Del análisis de los niveles de aceleración mostrados en la tabla 3.1 se observa que las aceleraciones máximas se presentan en la componente transversal en la mayoría de los sismo, y sólo en algunos en la componente longitudinal (15 de septiembre de 1983).

En general, las aceleraciones obtenidas desde 1975 en las estaciones acelerográficas han presentado bajos niveles (tabla 3.1). En campo libre y en el cuerpo de la cortina la aceleraciones no rebasan los 20 cm/s^2 ; sin embargo, los sismos 31 (11 de junio de 1993) y 36 (10 de septiembre de 1993) generaron aceleraciones entre 20 y 30 cm/s^2 , el sismo 80 (7 de junio de 1998) entre 30 y 40 cm/s^2 , el sismo 62 (31 de diciembre de 1996) entre 50 y 60 cm/s^2 , los sismos 6 (15 de septiembre de 1983) y 38 (14 de marzo de 1994) entre 70 y 80 cm/s^2 , el sismo 9 (31 de agosto de 1984) entre 100 y 150 cm/s^2 y sólo el sismo 49 (21 de octubre de 1995) generó más de 150 cm/s^2 . Es importante mencionar que estos ocho eventos tuvieron una magnitud mayor a los 5.2 grados y que en estos sismos los niveles de aceleración obedecen a la distancia epicentral, es decir, que mientras más cercana esta la fuente a la estructura, las aceleraciones en esta última son mayores.

Otro resultado importante es que los sismo que mayores niveles de aceleración generaron en la cortina, a excepción del ocurrido el 14 de marzo de 1994, todos presentaron aceleraciones mayores a media cortina que en la corona.

No. Sismo	Fecha	Distancia Epicentral (km)	Profundidad Focal (km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s^2)		
						V	L	T
1	6-Oct-75	29	-5	Mb=4.80	CHCS	0.0	0.0	5.8
2	5-Nov-75	41	-5	Mb=5.20	CHCS	11.5	27.1	14.5
3	14-Feb-81	397	-5		CHIC	8.7	20.0	9.9
4	17-ene-83	839	-5	Mb=4.5	CHIC	12.4	10.9	0.0
5	22-Jul-83	14	-5		CHIC	6.4	11.5	9.7
6	15-Sep-83	113	12	Mb=5.70	CHII	21.8	41.9	41.6
					CHID	40.6	44.7	47.0
					CHIB	15.6	11.1	13.7
					CHIM	26.9	73.0	73.4
					CHIC	31.8	60.5	39.6

TABLA 3.1 Características de los sismos registrados

No. Sismo	Fecha	Distancia Epicentral (km)	Profundidad Focal (km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
						V	L	T
7	18-Sep-83	107	14	Mb=5.20	CHIB	15.8	33.6	39.0
					CHIM	6.8	17.1	10.0
					CHIC	15.8	42.4	14.5
8	3-Ago-84	130	8		CHID	20.5	34.4	26.9
9	31-Ago-84	114	6	Mb=5.30	CHCS	17.1	20.3	25.9
					CHII	21.1	49.8	59.1
					CHID	49.5	55.9	39.8
					CHIB	16.3	31.2	26.5
					CHIM	0.0	55.6	59.3
					CHIC	45.1	59.7	125.5
10	7-Abr-86	191	-5	Mb=5.80	CHIC	5.8	4.6	6.2
11	5-Jul-86	146	11	Mb=5.30	CHII	11.7	18.8	12.2
12	3-Ene-87	20	31	Mc=3.40	CHIC	14.0	12.0	8.6
13	7-May-87	236	-5		CHIM	0.0	11.1	7.5
					CHIC	8.0	12.2	8.4
14	4-Oct-87	128	-5	Mb=5.30	CHIC	10.1	6.1	7.2
15	16-Sep-89	128	9	Mb=5.90	CHCS	22.5	21.5	49.8
				M=5.60				
16	6-Dic-89	151	7	Mb=5.20	CHII	2.4	6.7	4.8
				Ms=3.90				
				Mc=5.0				
17	17-Jul-90	141	6	Mb=4.60	CHIC	2.9	1.9	4.3
				Mc=4.80				
19	5-Oct-90	151	7	Mb=4.70	CHIC	3.8	2.9	5.3
				Mc=4.70				
20	5-Nov-90	131	11	Mb=4.70	CHII	2.4	3.4	6.7
				Mc=5.00				
21	27-Ene-91				CHIC	3.8	3.8	5.7
22	4-Feb-91	163	-5	Mb=4.90	CHID	3.8	5.3	10.1
				Mc=5.00	CHIC	5.7	9.1	10.5
24	31-May-91	157	9	Mc=4.90	CHCS	1.9	3.4	4.3
					CHII	4.1	9.2	10.4
					CHIC	8.1	5.7	12.4
25	25-Jul-91	238	-5	Mb=5.30	CHII	1.9	6.7	6.7
				M=5.20	CHID	2.4	3.4	4.8
26	30-Jul-91	142	-5	Mc=4.60	CHII	1.9	4.8	5.7
					CHID	2.9	3.4	5.3

TABLA 3.1 Características de los sismos registrados (Continuación)

No. Sismo	Fecha	Distancia Epicentral (km)	Profundidad Focal (km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
						V	L	T
27	30-Jul-91	142	-5	Mc=4.60	CHIC	3.8	4.3	6.2
28	20-Dic-91	211	12	Mc=4.90	CHID	3.8	3.4	6.7
					CHIB	1.4	3.4	2.4
					CHIC	4.3	3.4	5.3
29	30-May-92	320	19	Mc=5.50	CHIC	2.9	3.8	5.7
30	26-Oct-92	157	9	Mc=4.70	CHII	2.4	5.7	7.7
					CHIC	5.3	3.8	7.7
31	11-Jun-93				CHIB	23.5	18.7	29.7
32	21-Jun-93	48	20	Mc=4.70	CHCS	5.7	5.7	6.7
					CHII	5.3	9.1	7.7
					CHIM	6.2	5.7	8.6
					CHIC	4.8	5.3	7.7
34	3-Sep-93	329	69	Mb=5.80 Ms=6.80 Mc=6.5	CHCS	2.4	3.4	4.8
					CHII	9.6	11.5	16.8
					CHID	9.6	10.5	13.4
					CHIB	3.4	4.8	8.6
					CHIM	9.1	10.5	14.4
					CHIC	9.6	11.5	14.8
35	6-Sep-93	135	5	Mc=4.30	CHCS	1.9	2.9	3.8
					CHII	3.4	6.2	7.2
					CHID	4.8	3.8	8.6
					CHIM	6.2	5.7	8.1
36	10-Sep-93	311	14	Mb=6.30 Ms=7.30	CHCS	3.8	6.7	10.5
					CHII	10.1	15.3	20.1
					CHID	19.6	18.2	24.4
					CHIB	5.9	9.5	10.4
					CHIM	10.5	15.3	17.2
					CHIC	13.9	18.7	28.2
37	12-Mar-94	163	73	Mb=5.10 Mc=5.00	CHID	5.7	5.7	12.0
					CHIC	5.7	6.2	9.1
38	14-Mar-94	140	95	M=6.50	CHCS	10.5	19.6	16.8
					CHID	39.7	31.6	58.4
					CHIC	44.5	51.2	76.6
39	25-Mar-94	248	40	Mb=5.00 Mc=5.00	CHIC	4.3	5.3	5.7

TABLA 3.1 Características de los sismos registrados (Continuación)

No. Sismo	Fecha	Distancia Epicentral (km)	Profundidad Focal (km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
						V	L	T
40	10-Abr-94	270	5	Mc=5.50	CHII	2.4	4.8	6.2
					CHID	5.7	4.3	5.7
					CHIM	2.9	3.8	4.8
					CHIC	5.3	5.3	8.1
41	27-Ago-94	178	115	Mb=4.70 Mc=5.00	CHII	2.9	8.6	8.6
					CHIM	3.8	5.3	9.6
					CHIC	4.8	5.3	8.1
42	28-Ago-94	328	22	Mb=5.40 M=5.20	CHIC	3.4	3.4	5.7
43	14-Sep-94	69	70	Mb=4.40 Mc=4.80	CHII	3.8	14.8	12.4
44	18-Oct-94	124	90	Mb=4.30 Mc=4.60	CHII	2.9	6.7	6.2
					CHIM	4.3	4.8	8.1
					CHIC	3.8	5.3	8.1
45	31-Oct-94	244	10	Mb=5.10 Ms=4.80 M=5.10	CHII	3.8	5.3	8.1
					CHID	5.8	5.3	12.4
					CHIM	4.8	4.3	7.7
					CHIC	7.2	4.8	9.1
46	16-Nov-94	192	74	Mc=4.90	CHII	1.9	5.3	3.8
47	30-Nov-94	144	114	Mb=4.50 Mc=4.90	CHII	2.9	4.3	5.7
48	17-Ene-95				CHII	1.7	3.6	5.8
49	21-Oct-95	68	120	Mw=6.9 ME=6.5	CHCS	40.2	65.1	53.1
					CHII	73.2	158.3	149.7
					CHID	132.5	148.3	269.8
					CHIB	66.0	77.0	97.6
					CHIM	92.4	139.3	214.8
					CHIC	110.5	123.4	200.0
50	7-Ene-96	194	103	Mc=4.7	CHII	2.4	7.7	7.7
					CHID	5.7	4.3	8.6
					CHIM	3.4	6.7	5.7
					CHIC	6.7	3.4	13.9
51	18-Feb-96	186	90	Mc=4.3	CHII	1.9	4.3	4.3
					CHID	4.8	4.3	8.1
					CHIM	2.9	5.3	7.2
					CHIC	1.9	3.4	7.7

TABLA 3.1 Características de los sismos registrados (Continuación)

No. Sismo	Fecha	Distancia Epicentral (km)	Profundidad Focal (km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
						V	L	T
52	2-may-96	141	53	Mc=4.7	CHII	2.9	4.8	5.3
					CHID	3.4	3.4	5.7
					CHIM	2.9	4.3	4.8
					CHIC	2.9	3.8	4.8
53	15-Jul-96	143	57	Mc=4.5	CHIC	2.4	2.9	4.8
54	12-Oct-96	245	121	Mc=4.5	CHIC	0.7	0.7	1.2
55	19-Oct-96	41	5	Mc=4.8	CHII	2.1	6.1	5.5
					CHID	4.5	2.6	5.9
					CHIM	2.6	3.5	4.5
					CHIC	1.4	1.5	3.4
56	19-Oct-96	41	5	Mc=4.8	CHIC	4.1	4.4	7.3
57	19-Oct-96	163	45	Mc=4.7	CHIC	1.4	1.2	2.0
58	11-Nov-96	172	19	Mc=4.6	CHIC	1.8	2.4	3.5
59	17-Nov-96	223	62	Mc=4.7	CHIC	1.0	1.4	1.5
60	5-Dic-96	327	14	Mc=5.2	CHIC	1.0	1.4	2.0
61	19-Dic-96	129	83	Mc=4.4	CHIC	0.5	0.8	1.3
62	31-Dic-96	133	166	Mc=5.6	CHCS	5.3	18.7	13.9
					CHII	18.7	44.0	42.1
					CHIB	11.5	15.8	22.5
					CHIM	19.8	31.7	59.2
					CHIC	28.3	31.8	48.2
63	1-Ene-97	116	93	Mc=4.4	CHIC	0.7	0.8	1.0
64	1-Ene-97	167	40	Mc=4.7	CHIC	1.3	1.3	2.1
65	15-Ene-97	169	151	Mc=4.3	CHIC	0.5	0.4	1.1
66	6-Feb-97	137	121	Mc=4.3	CHIC	0.9	1.0	1.6
67	9-Feb-97	151	9	Mc=4.2	CHIC	1.1	1.6	1.7
68	20-Feb-97	124	90	Mc=4.0	CHIC	0.6	0.7	1.0
69	15-Mar-97	114	130	Mc=4.8	CHIC	1.3	1.8	2.2
70	31-Mar-97	111	144	Mc=4.6	CHIC	1.1	1.3	2.3
71	20-Abr-97	166	38	Mc=4.5	CHIC	0.8	1.0	1.3
72	29-Abr-97	208	121	Mc=4.7	CHII	2.5	5.3	4.5
					CHID	3.7	4.3	6.7
					CHIM	2.1	4.9	4.5
					CHIC	3.1	3.6	5.8
73	27-Jun-97	166	139	Mc=4.50	CHIC	1.9	1.6	3.5
74	7-Ago-97	97	89	Mc=4.70	CHII	2.2	4.4	5.1
					CHID	3.2	3.9	4.9
					CHIM	2.5	5.2	3.8
					CHIC	3.2	3.2	6.1

TABLA 3.1 Características de los sismos registrados (Continuación)

No. Sismo	Fecha	Distancia Epicentral (km)	Profundidad Focal (km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
						V	L	T
75	5-Sep-97	117	55	Mc=4.8	CHII	2.0	4.4	6.2
					CHID	5.8	4.0	5.4
					CHIC	5.2	5.5	7.1
76	6-Sep-97	202	48	Mc=4.7	CHIC	0.8	0.7	1.5
77	10-Ene-98	325	80	M=6.3	CHCS	2.4	5.7	4.7
					CHII	3.9	10.7	11.2
					CHID	8.1	10.1	13.9
					CHIB	2.9	5.8	5.8
					CHIM	6.9	7.9	10.9
					CHIC	9.2	10.7	17.2
78	25-Abr-98	143	47	Mc=4.9	CHCS	2.3	3.5	4.3
					CHII	4.5	10.2	8.1
					CHID	7.7	7.4	13.4
					CHIM	4.6	5.1	7.4
79	2-Jun-98	118	4	Mc=4.7	CHCS	1.9	4.0	3.2
					CHII	3.9	10.1	16.9
					CHID	13.6	8.0	8.8
					CHIB	2.4	3.7	4.4
					CHIM	3.9	8.4	9.4
					CHIC	9.4	10.8	15.2
80	7-Jun-98	163	16	Mc=5.2	CHCS	8.1	14.4	14.4
					CHII	12.5	29.7	33.5
					CHID	17.7	25.8	30.2
					CHIB	10.1	10.1	12.2
					CHIM	15.3	22.5	25.9
					CHIC	18.1	28.6	35.4
81	9-Jun-98	165	17	Mc=5.0	CHCS	1.6	2.5	2.8
					CHII	2.3	5.2	6.0
					CHID	4.8	4.3	6.6
					CHIB	2.1	1.9	2.6
					CHIM	3.7	5.3	6.9
82	23-Dic-98	193	137	Mc=4.6	CHII	1.9	5.9	6.4
					CHID	5.8	3.7	8.3
					CHIB	1.9	2.0	3.3
					CHIM	2.8	6.3	7.5
					CHIC	4.3	3.5	7.5

TABLA 3.1 Características de los sismos registrados (Continuación)

No. Sismo	Fecha	Distancia Epicentral (km)	Profundidad Focal (km)	Magnitud Richter	Estación	Aceleración máxima (cm/s ²)		
						V	L	T
83	15-Jun-99	500	69	Mb=6.4 Ms=6.5 Ma=6.3 Me=7.0	CHII	1.8	4.9	5.8
					CHID	3.1	2.7	6.7
					CHIC	3.0	3.4	6.6
84	29-Jul-99	153	108	Mc=4.7 Mb=5.0	CHCS	1.9	3.0	1.9
					CHII	3.8	7.7	7.6
					CHID	4.3	4.1	7.9
					CHIM	4.7	7.0	5.9
CHIC	4.6	4.2	7.0					
85	14-Ago-99	166	74	Mc=4.7	CHID	2.1	2.0	5.3
86	30-Sep-99	445	16	Mb=6.5	CHCS	2.0	2.7	2.6
					CHII	1.7	5.4	6.8
					CHID	4.0	5.4	7.9
					CHIM	3.8	4.4	5.6
CHIC	4.6	4.4	12.0					
87	11-Nov-99	160	55	Mc=4.5	CHCS	1.2	2.2	1.5
					CHII	1.9	4.2	5.6
					CHID	3.0	4.3	6.1
					CHIM	3.5	3.5	5.8
88	12-Mar-00	119	98	Mc=4.5 Mc=4.2	CHII	2.6	8.5	7.9
					CHID	2.9	5.9	7.7
					CHIB	3.4	2.7	5.4
					CHIM	6.4	5.1	8.0
CHIC	5.4	6.7	6.9					
89	12-Mar-00	260	35	Mc=5.4 Mb=5.5	CHII	6.7	13.8	15.7
					CHID	11.8	11.8	16.9
					CHIB	3.5	4.9	7.3
					CHIM	7.9	11.0	15.3
CHIC	11.0	13.4	19.2					
90	17-Oct-00	184	168	Mc=5.4 Mb=5.5	CHID	2.4	2.3	3.4

TABLA 3.1 Características de los sismos registrados (Continuación)

Los espectros de respuesta de los sismos registrados en roca (estaciones pueblo, margen izquierda y margen derecha) presentan contenidos de energía concentrados entre 1.0 y 10.0 Hz y aceleraciones características en frecuencias superiores a 2.0 Hz. Los niveles de aceleración, a excepción del sismo 49 (21 de octubre de 1995), son menores de 0.1 g en la estación del pueblo (fig. 3.2), menores de 0.30 g en la estación de margen izquierda (fig. 3.3) y menores de 0.25 g en la estación de margen derecha (fig. 3.4).

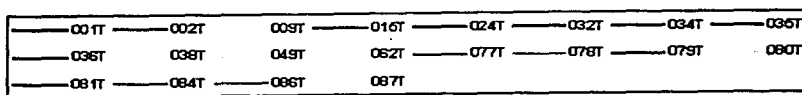
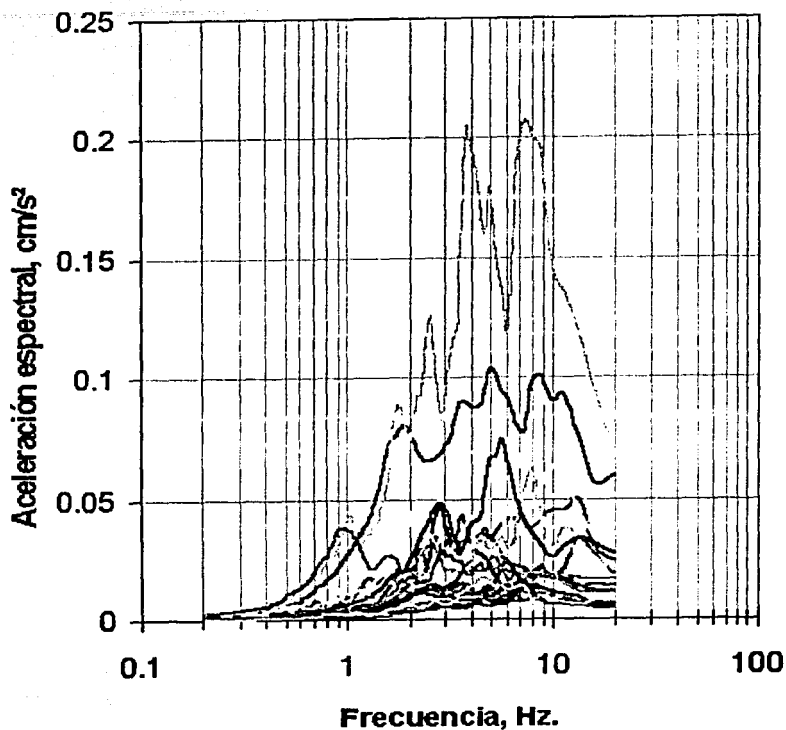
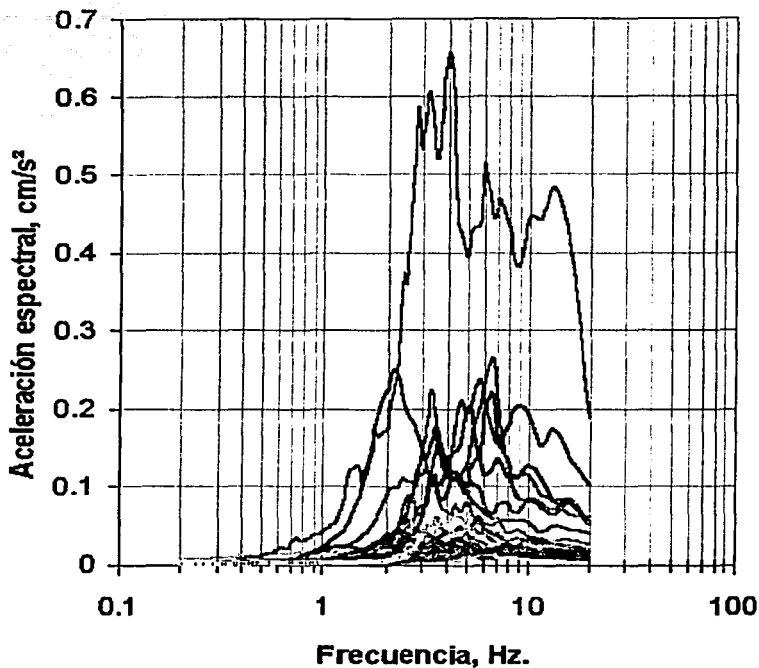


Fig. 3.2 Espectros de respuesta en roca. Estación pueblo

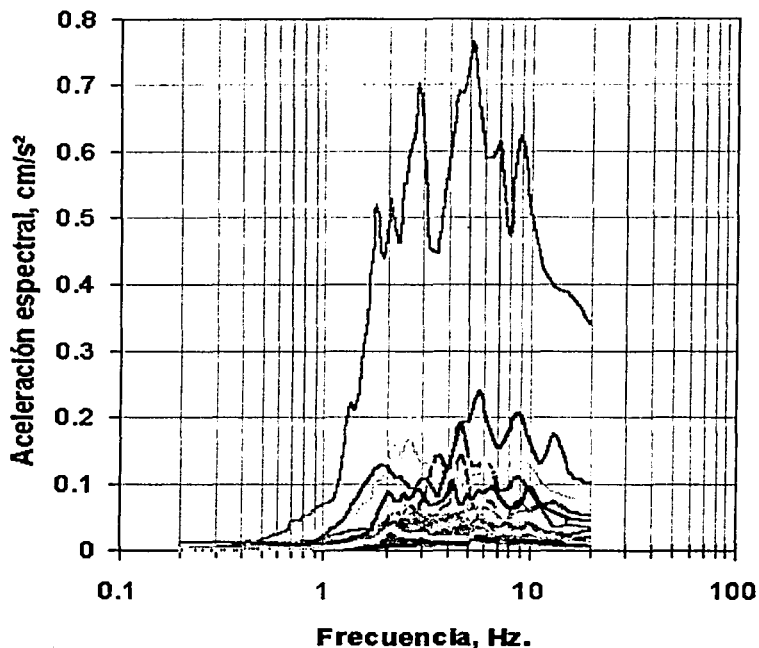
La configuración de los espectros de respuesta acusa comportamiento diferente entre las estaciones de roca e incluso entre las estaciones de ambos márgenes la respuesta es diferente, lo que sugiere un fuerte efecto de sitio provocado principalmente por la geología y topografía de la zona en la que se encuentra instalada la estación acelerográfica.



006T	009T	011T	016T	020T	024T	025T	026T
030T	032T	034T	035T	036T	040T	041T	043T
044T	045T	046T	047T	048T	049T	050T	051T
052T	055T	062T	072T	074T	075T	077T	078T
079T	080T	081T	082T	083T	084T	085T	087T
088T	089T						

Fig. 3.3 Espectros de respuesta en roca. Estación margen izquierda

En particular, el sismo 49 (21 de octubre de 1995) presentó niveles de aceleración importantes en las estaciones de roca, pero en cada estación las aceleraciones y forma del espectro son ligeramente diferentes. Mientras que en la margen izquierda es excitada la frecuencia de 3 Hz, en la margen derecha la frecuencia excitada es la de 5 Hz, aunque existe respuesta importante en las frecuencias 1.8 y 2.8 Hz.



006T	008T	009T	022T	025T	026T	028T	034T
035T	036T	038T	040T	045T	049T	050T	051T
052T	055T	072T	074T	075T	077T	078T	079T
080T	081T	082T	083T	084T	085T	086T	087T
088T	089T	090T					

Fig. 3.4 Espectros de respuesta en roca. Estación margen derecha

3.2 Característica de vibración de la cortina

Para determinar las características de vibración se hace la hipótesis de que los movimientos en la base de la cortina, en las direcciones transversal, longitudinal y vertical son estadísticamente independientes entre sí y por lo tanto existe una función de transferencia para cada dirección. Esto en realidad no es del todo cierto, ya que existe una correlación entre las tres componentes de los movimientos, la cual afecta a la forma de la función de transferencia. Sin embargo, la función de

transferencia para movimientos independientes, contiene el aspecto más relevante de las características de vibración de la presa que es su frecuencia predominante de vibración.

El análisis del comportamiento dinámico de la presa Manuel Moreno Torres Chicoasén sometida a la vibración sísmica se presenta a partir de la información recabada desde el año 1975 hasta octubre del 2000 y calculando con el Método de Vibraciones Aleatorias los espectros de respuesta, las funciones de transferencia, las funciones de coherencia y los ángulos de fase.

3.2.1 Espectros de Respuesta

En general, en el cuerpo de la cortina las aceleraciones espectrales presentan valores menores de 0.15 g en la base de la cortina (fig. 3.5), menores de 0.32 g a media cortina (fig. 3.6) y menores de 0.4 g en la corona (fig. 3.7). La configuración de los espectros acusan respuesta arriba de los 3 Hz en la estaciones base cortina y media cortina. En la corona el espectro presenta respuesta en frecuencias arriba de 1.3 Hz.

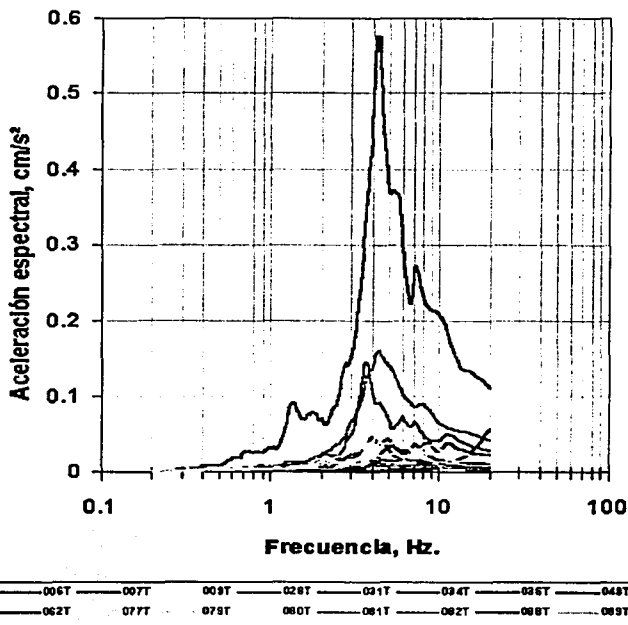
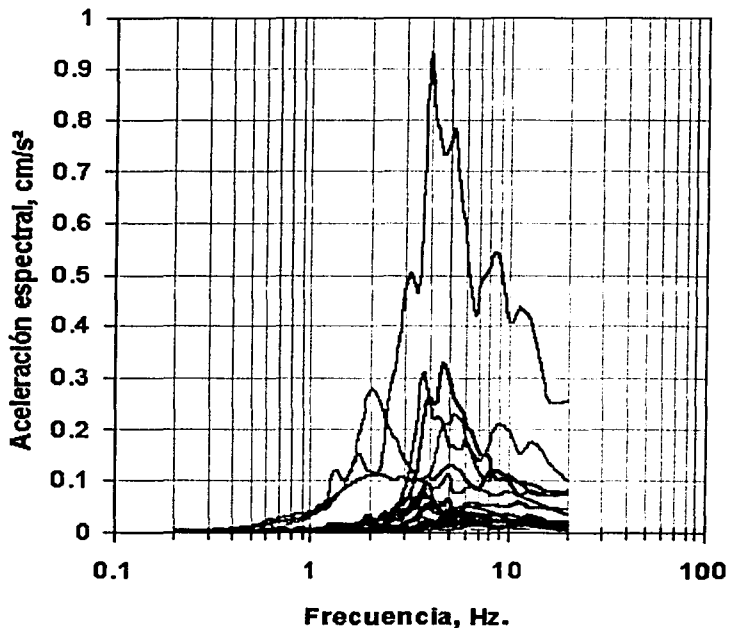


Fig. 3.5 Espectros de respuesta en la cortina. Estación base cortina

En los espectros de respuesta calculados con los sismos registrados en el cuerpo de la cortina se observa que el sismo 49 (21 de octubre de 1995) fue el evento que generó mayores aceleraciones espectrales. En la base y a media cortina la frecuencia principal de vibración fue 4.0 Hz y en ella se presentaron aceleraciones de 0.6 y 0.91 g, respectivamente. En la corona la vibración se presentó en 1.7 hz y se desarrollo una aceleración espectral de 0.8 g.



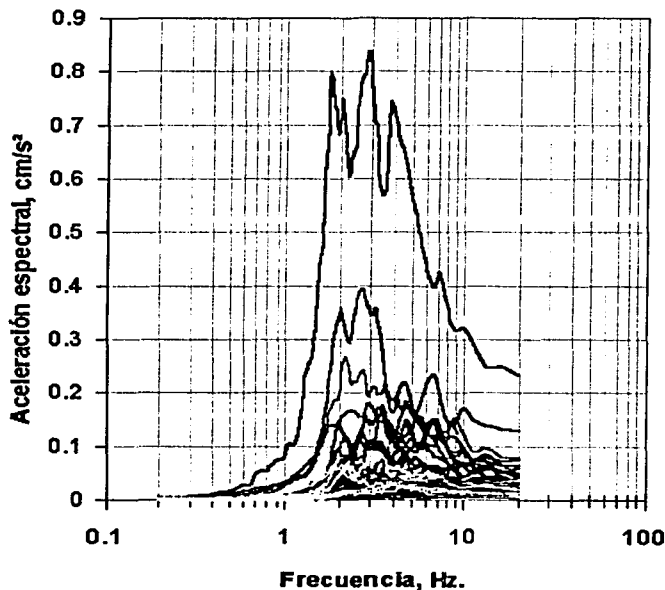
006T	007T	009T	013T	032T	034T	035T	036T
040T	041T	044T	045T	049T	050T	051T	052T
055T	062T	072T	074T	077T	078T	079T	080T
081T	082T	084T	086T	087T	088T	089T	

Fig. 3.6 Espectros de respuesta en la cortina. Estación media cortina

La diferencia en la respuesta en diferentes niveles implica una influencia importante de la forma del cañón sobre el que esta construida la cortina. Según los espectros de respuesta a la cortina se le puede dividir en dos cuerpos, uno que se define entre la base y la media cortina que vibra con una cierta rigidez y el segundo de media cortina a la corona que vibra como un cuerpo más flexible, teniéndose mayores

aceleraciones a media cortina que a nivel de la corona. Por tanto, las aceleraciones máximas que se presentan en el primer cuerpo se aminoran al pasa al segundo cuerpo.

Este comportamiento particular de la cortina se debe principalmente a que el cañón es muy estrecho hasta la elevación 300 (aproximadamente a media cortina) y a mayor elevación es más amplio. Además, la distribución de los materiales y la configuración de la sección máxima hace que la parte superior de la cortina sea más flexible.



003T	004T	005T	006T	007T	009T	010T	012T
013T	014T	017T	019T	021T	022T	024T	027T
028T	029T	030T	032T	034T	036T	037T	039T
039T	040T	041T	042T	044T	045T	049T	050T
051T	052T	053T	054T	055T	056T	057T	059T
059T	060T	061T	062T	063T	064T	065T	066T
067T	069T	069T	070T	071T	072T	073T	074T
075T	076T	077T	079T	080T	082T	083T	084T
086T	088T	089T					

Fig. 3.7 Espectros de respuesta en la cortina. Estación corona centro

Es de esperarse que bajo sismos intensos, los materiales de la cortina entren al intervalo de comportamiento francamente no lineal y que los amortiguamientos equivalentes sean mayores. Desafortunadamente no fue posible definirlo en el análisis dinámico de esta estructura con la información disponible.

3.2.2 Funciones de Transferencia

La transferencia de los movimientos en la cortina presenta una forma y distribución característica en el dominio de las frecuencia.

En general, de la base a la cortina, las mayores amplificaciones se presentan entre 1.5 y 3 Hz (fig. 3.8). La frecuencia donde el movimiento se amplifica es 1.89 Hz para el sismo 49 y presenta un factor de amplificación de 16.18, en 1.98 Hz para el sismo 9 se presenta un factor de amplificación de 13.21, en 2.77 Hz para el sismo 6 se presenta un factor de amplificación de 3.89, y en 2.14 Hz el sismo 36 se amplifica 8.91 veces.

Entre 4 y 5 Hz se observa una zona donde se presentan factores de amplificación igual a 1, que corresponde a una situación en la que los movimientos no se amplifican. En frecuencias mayores, los factores de amplificación no son mayores a 3.

Prácticamente la frecuencia de vibración de la cortina se puede considerar en 2 Hz que equivale a un periodo de 0.5 s, estos es conveniente reconfirmarlo cuando se tengan registros de sismos de mayor magnitud.

En las funciones de amplificación no se generaliza una relación directa entre la magnitud del sismo, el factor de amplificación y la frecuencia de vibración. Es posible determinar que a mayor magnitud del sismo aunada a la distancia epicentral la frecuencia de vibración disminuye y la amplitud se incrementa

Los factores de amplificación de la base a media cortina presentan valores menores a 4, y las frecuencias donde se desarrollan dichas amplificaciones es 2, 4 y 10 Hz, principalmente (fig. 3.9). Las amplificaciones se presentan en frecuencias superiores, lo que representa el movimiento de un cuerpo rígido.

El sismo 7 presentó importantes atenuaciones de movimientos

De media cortina a la corona los movimientos experimentan amplificaciones con factores superiores a 5, incluso para sismos de mediana magnitud. La configuración acusa un periodo de vibración alrededor de los 2 Hz (fig. 3.10). Aunque existen otras frecuencias donde los movimientos de media cortina son amplificados en la corona, las mayores amplificaciones se presentan en los 2 Hz.

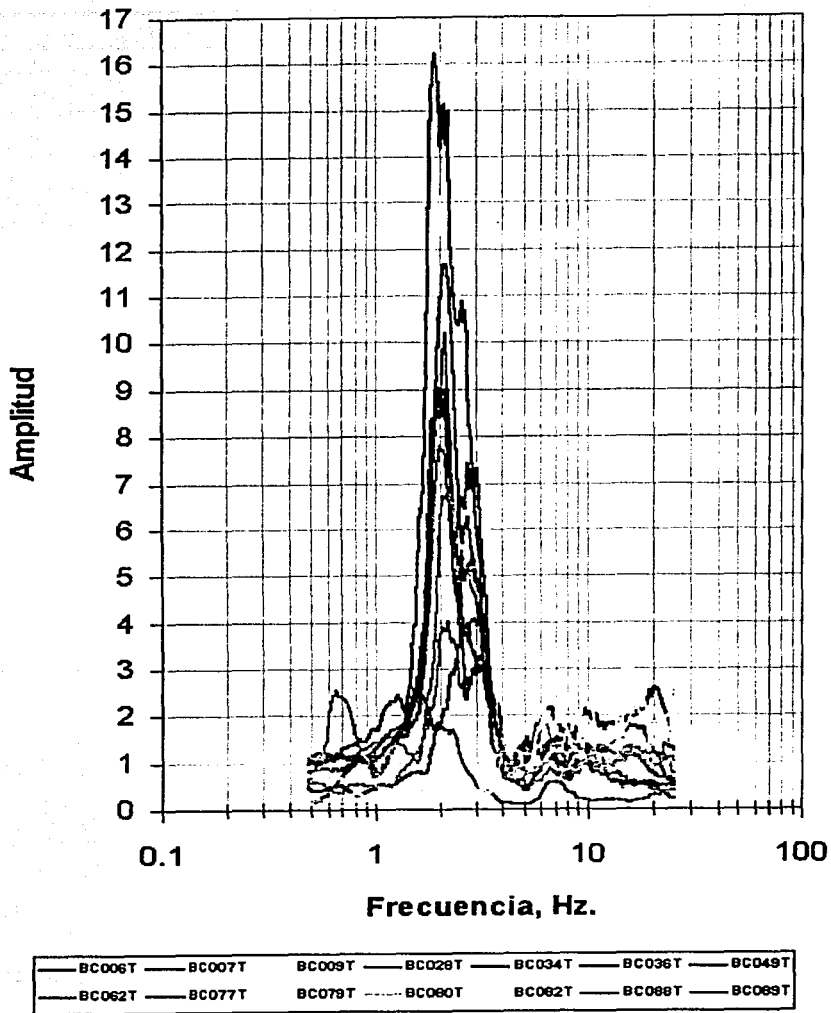


Fig. 3.8 Función de transferencia de la base a la corona

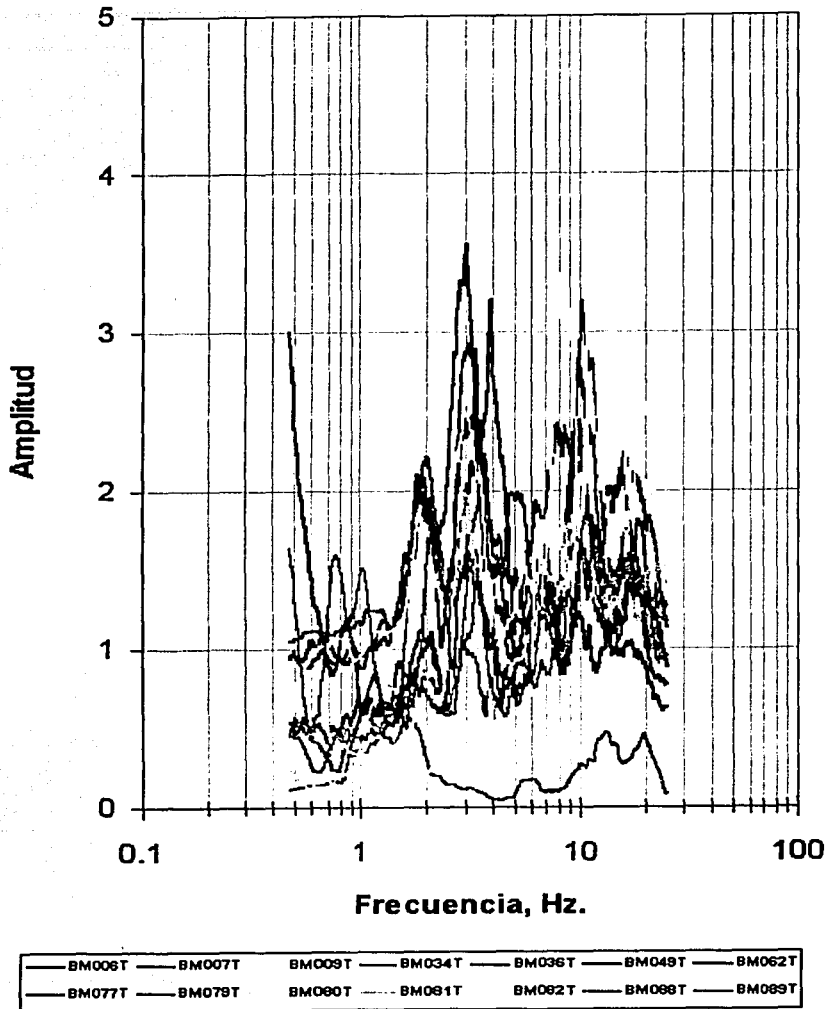
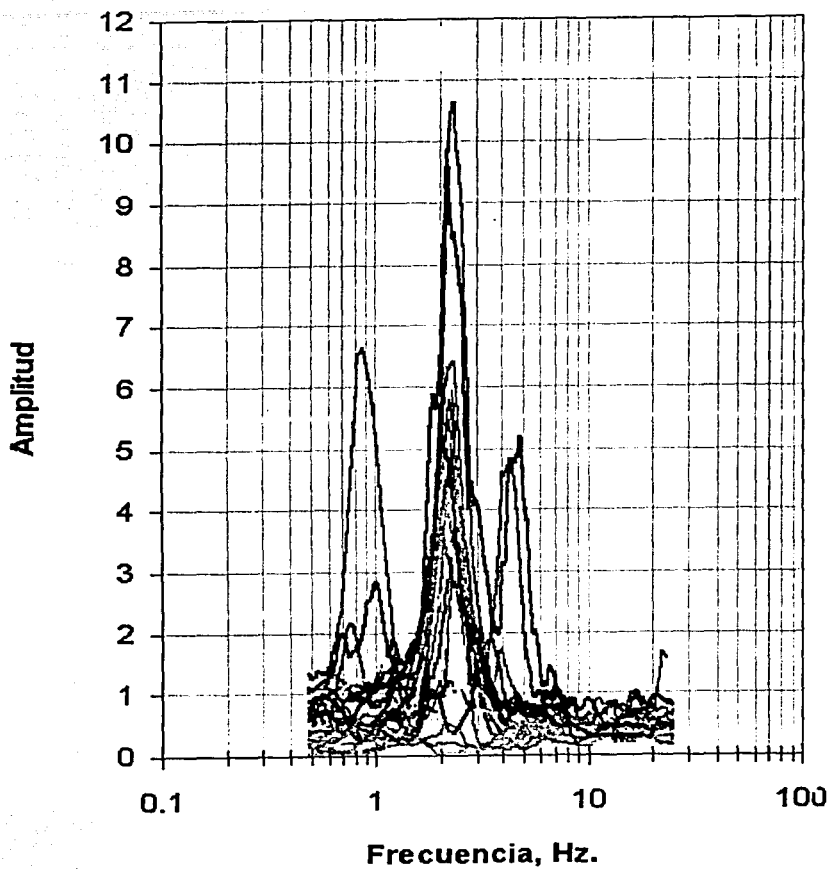


Fig. 3.9 Función de transferencia de base a media cortina



MC006T	MC007T	MC009T	MC013T	MC032T	MC034T	MC036T
MC040T	MC041T	MC044T	MC045T	MC049T	MC050T	MC051T
MC052T	MC055T	MC062T	MC072T	MC074T	MC077T	MC079T
MC080T	MC082T	MC084T	MC086T	MC088T	MC089T	

Fig. 3.10 Función de transferencia de media cortina a corona

3.2.3 Funciones de coherencia

La dependencia entre los movimientos registrados en la base y en la corona de la cortina puede estudiarse a partir de las funciones de coherencia (figs. 3.11 a 3.13).

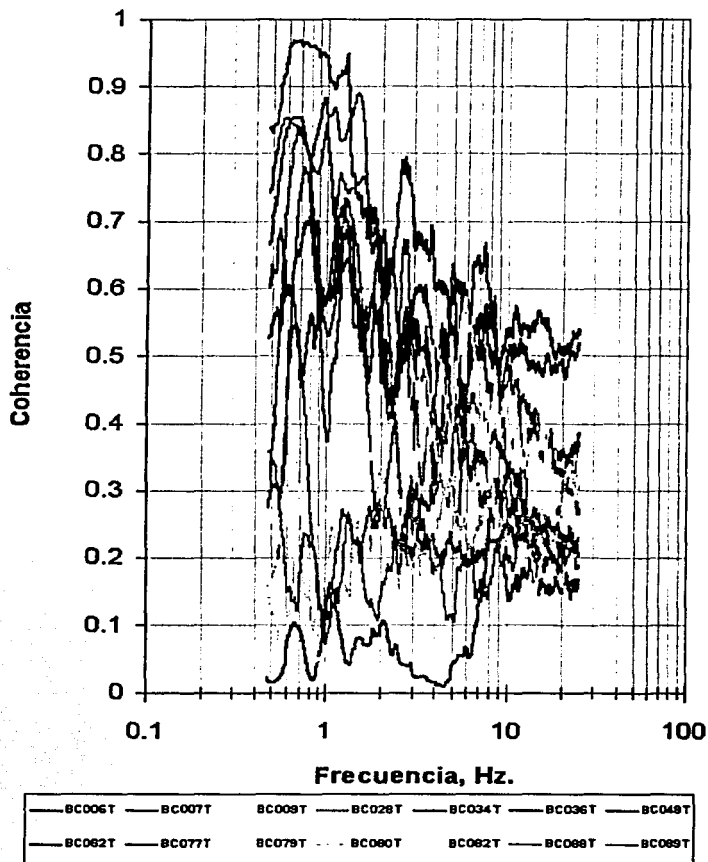


Fig. 3.11 Función de coherencia de la base a la corona

Aún cuando se encuentra dibujadas las funciones de la coherencia entre los registros de la base y de la corona de varios sismos, es posible observar en la figura 3.11 que existe una marcada independencia entre los movimientos registrados

puesto que la función de coherencia es menor que 0.8 en el rango de frecuencias donde se ubica la vibración natural de la cortina, entre 1, 1.5 y 3 Hz.

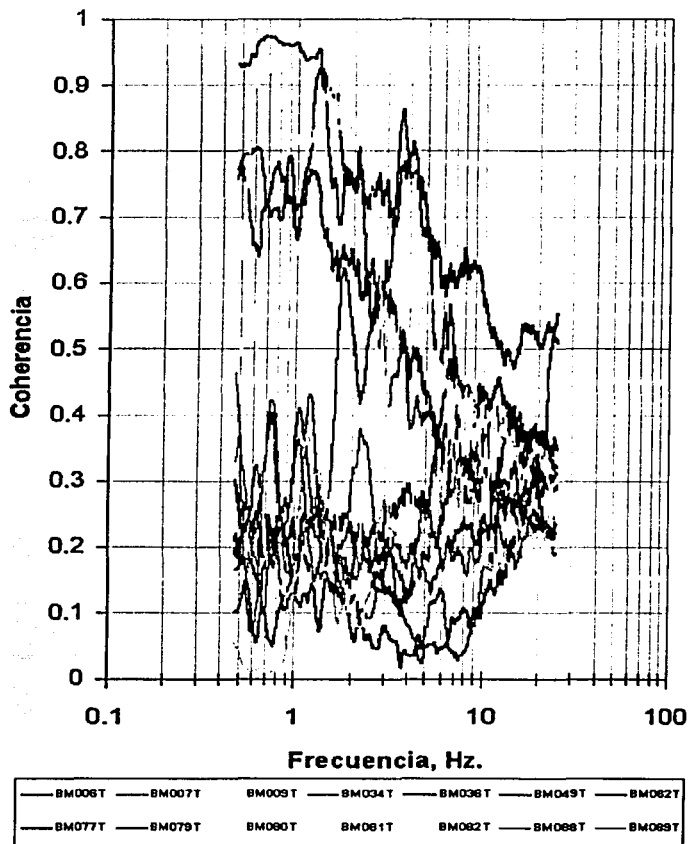


Fig. 3.12 Función de coherencia de la base a media cortina

De la base a media cortina los sismos de mayor magnitud son en los que se observa mayor dependencia de los movimientos registrados. Pero en todos los caso los valores de la función de coherencia no son mayores 0.8 (fig. 3.12). Un fenómeno importante que se puede observar es que a mayores frecuencias los factores de coherencia son menores, es decir, que a mayor frecuencia la dependencia entre los movimientos entre los puntos analizados decrece.

Para sismos de menor magnitud los valores de coherencia son más uniformes en todo el contenido de frecuencias dibujado en la figura 3.12.

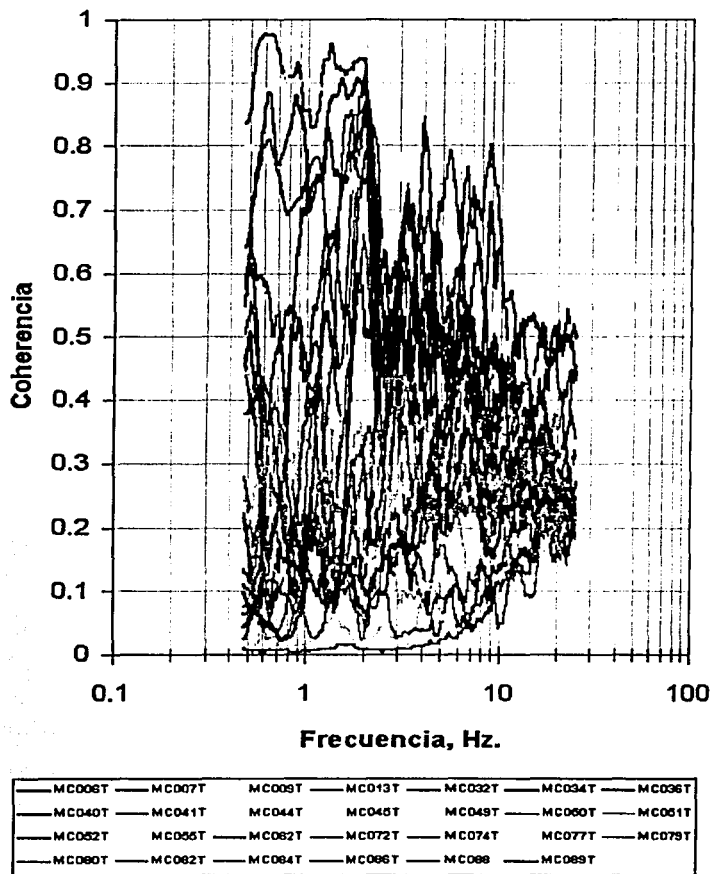


Fig. 3.13 Función de coherencia de media cortina a la corona

En las funciones de coherencia evaluadas entre media cortina y la corona es posible observar valores de dependencia mayores que de la base a media cortina (fig. 3.12 y 3.13), lo que se traduce en que los movimiento de media cortina se transfieren a la corona de forma más integral.

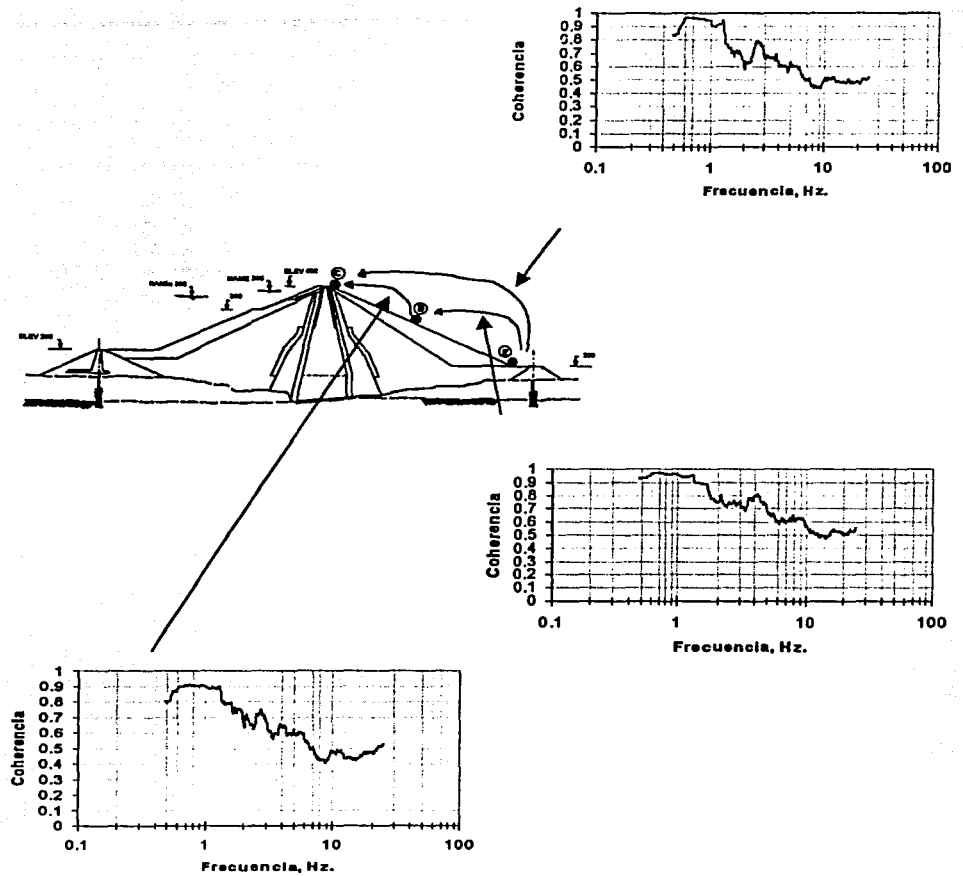


Fig. 3.14 Función de coherencia en la cortina para el sismo 49

En el sismo 49 el valor de la función de coherencia decrece a partir de 2 Hz, entre cada dos puntos analizados, por lo que es un sismo que no tiene genera uniformes los valores de coherencia. La configuración de la coherencia entre puntos hace notar la independencia que existe en ellos.

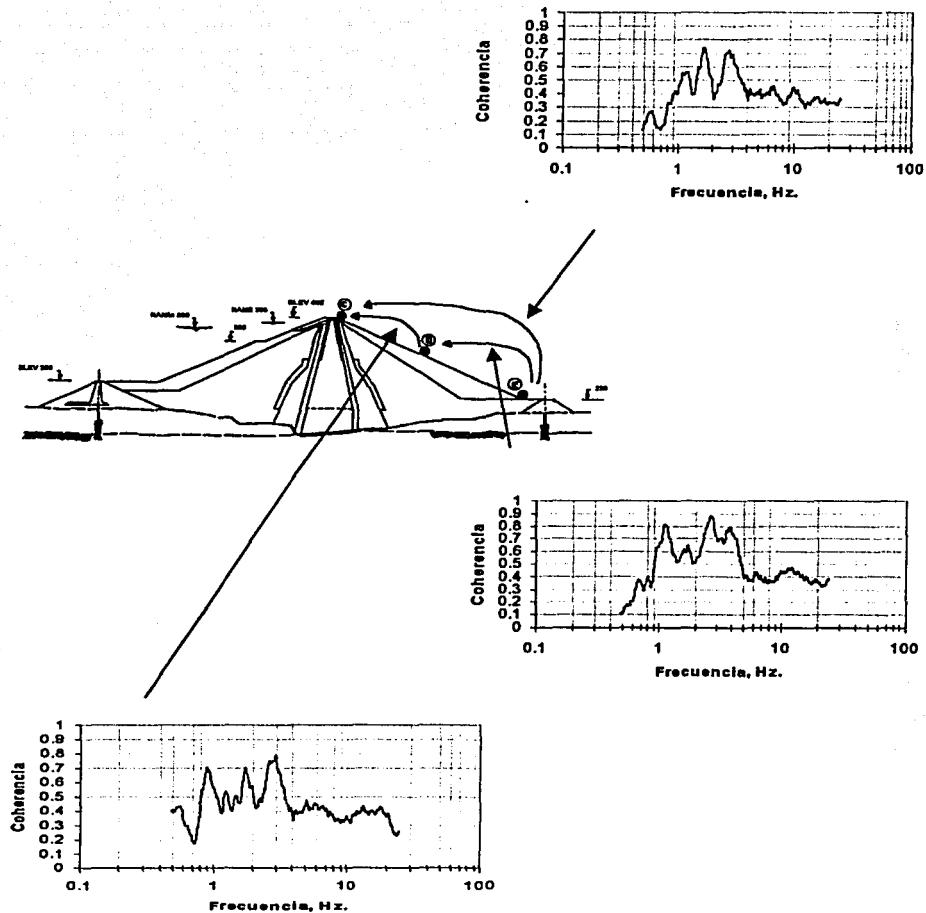


Fig. 3.15 Función de coherencia en la cortina para el sismo 9

Para este sismo en 2 Hz se notar que el factor de coherencia es semejante de la base a la corona, de media cortina a la corona y de la base a media cortina, aun cuando la función de coherencia es diferente en otras frecuencias.

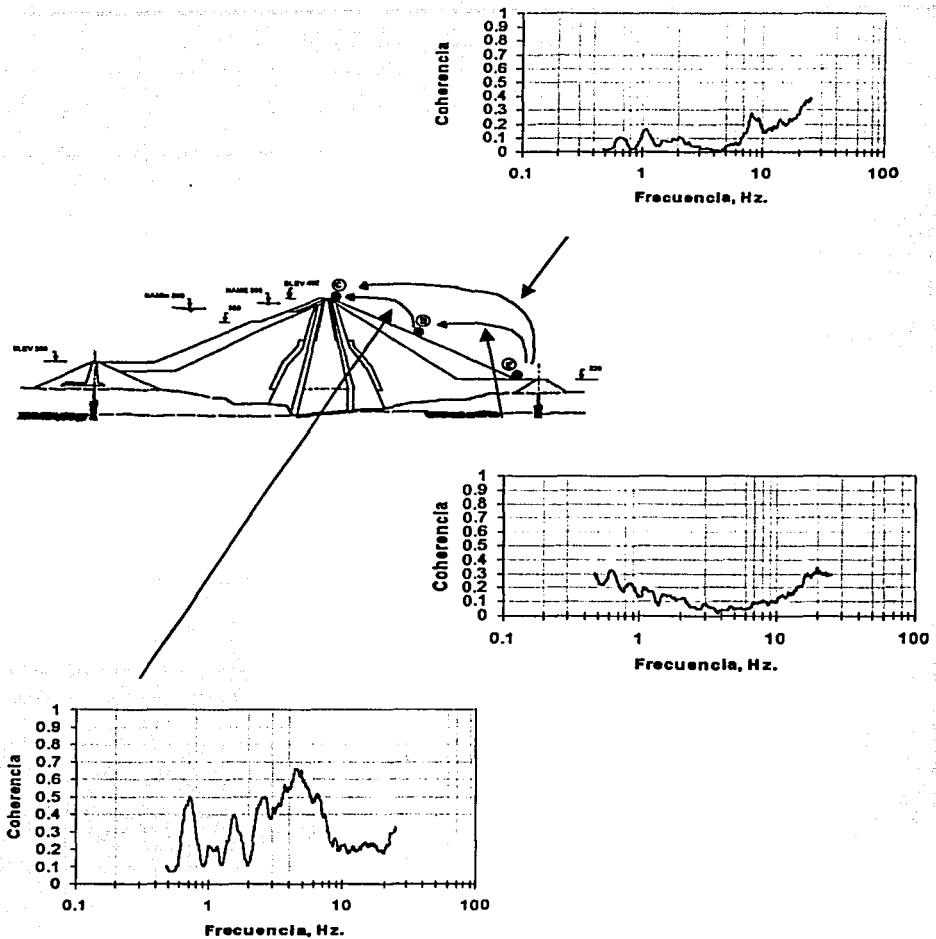


Fig. 3.16 Función de coherencia en la cortina para el sismo 6

Los factores son menos uniformes y el registro que tenemos es diferente a lo largo de las frecuencias, pero es importante observar que en la frecuencia 2 Hz todas las funciones toman un valor de 0.1.

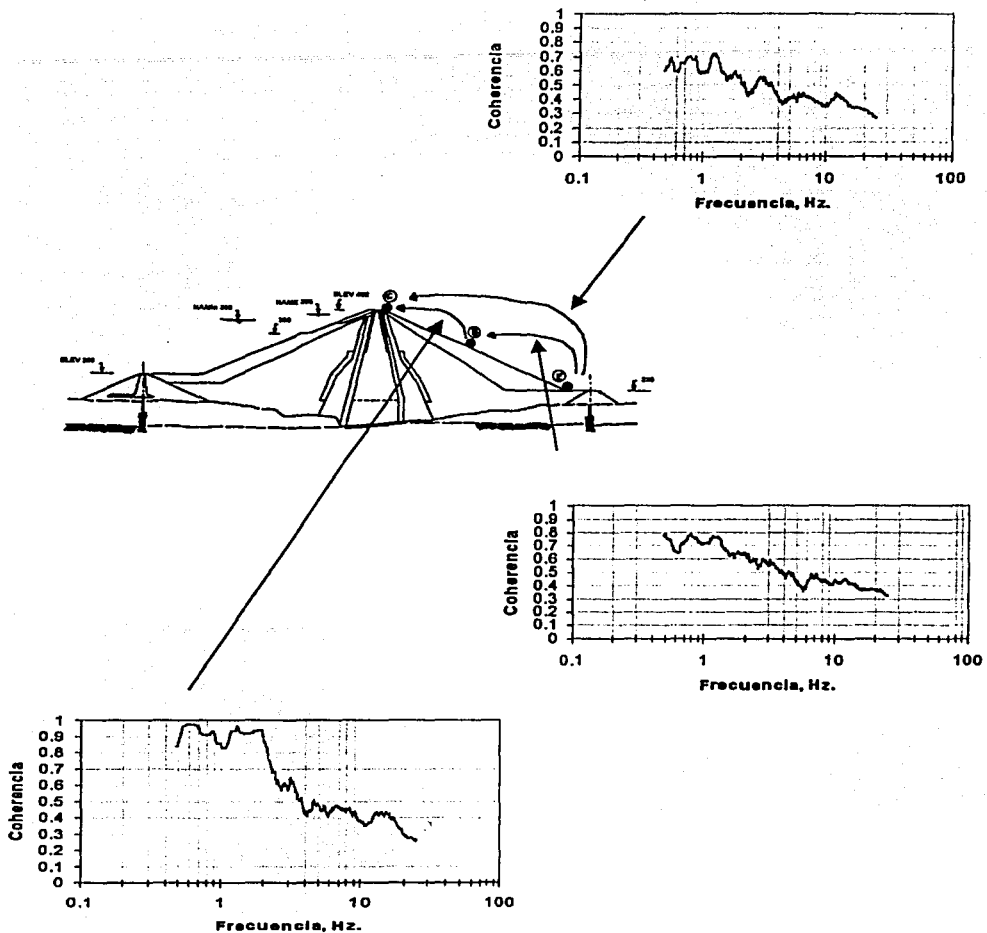


Fig. 3.17 Función de coherencia en la cortina para el sismo 36

A partir de la frecuencia 2 Hz, podemos notar que el comportamiento de las funciones son semejantes por lo que la relación es menos uniforme lo que indica que es más independiente. Es característica la respuesta de media cortina a la corona a bajo de 2 Hz donde el valor es casi similar a 1.

3.2.4 Ángulos de fase

El desfaseamiento de la respuesta entre la base y la corona es relativamente pequeño para la mayoría de los sismos, los valores de desfaseamiento no rebasan los 80° en las frecuencias de 0.4 a 25 Hz, mientras que en el rango donde vibra naturalmente la cortina los ángulos de fase son menores a 40° (fig. 3.14).

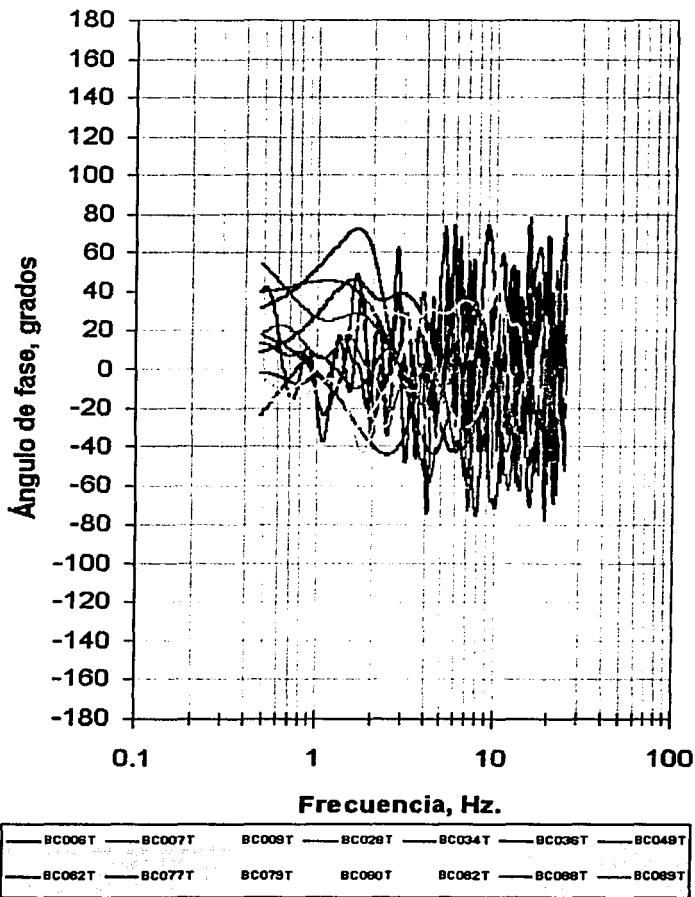


Fig. 3.14 Ángulo de fase entre la base y la corona

El desfase de la respuesta entre la base y media cortina para la mayoría de los sismos es menor de 60° (fig. 3.15). Para frecuencias mayores a 10 Hz los ángulos de fase tienen valores cercanos a los 100° .

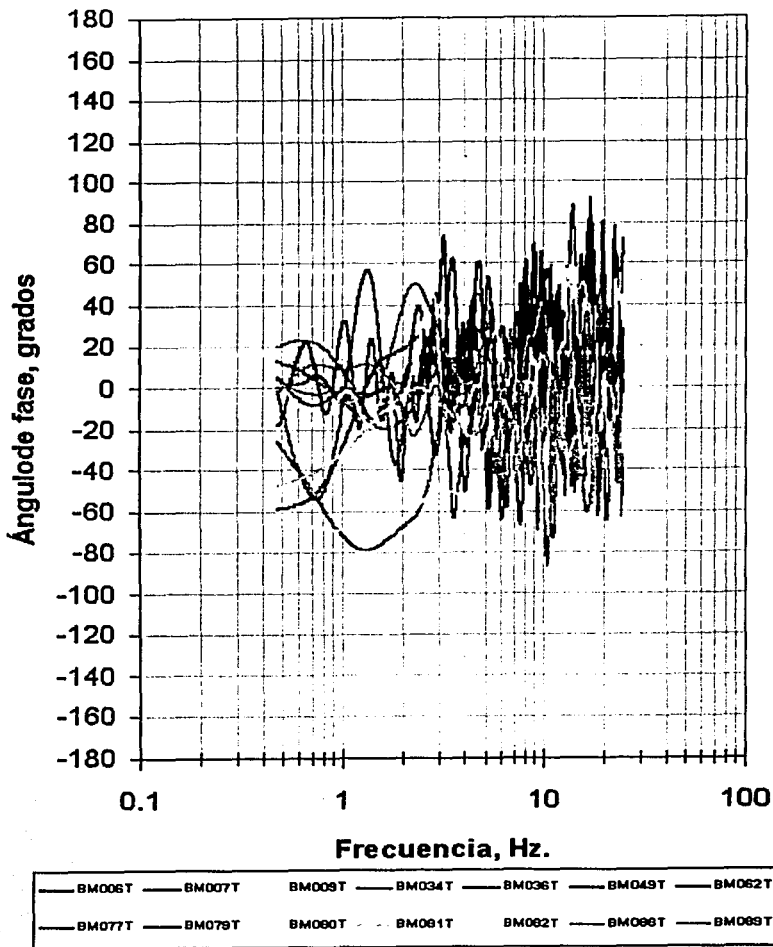


Fig. 3.15 Ángulo de fase entre la base y media cortina

De media cortina a la corona los ángulos de fase presentan valores menores a 100° , aunque en algunas frecuencias se tienen valores de hasta 140°

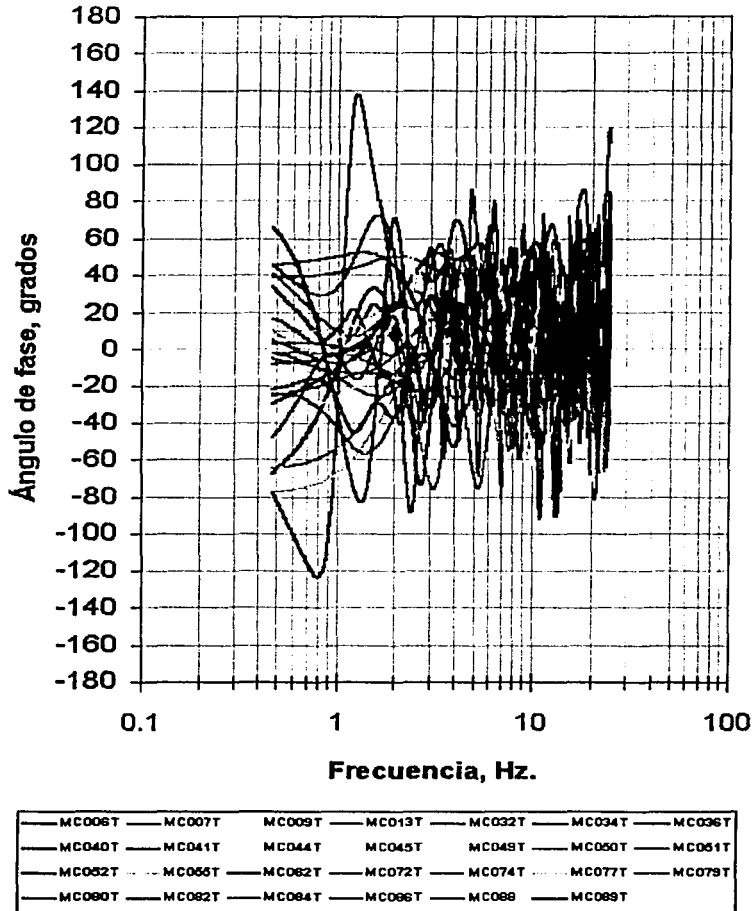


Fig. 3.16 Ángulo de fase entre media cortina y la corona

Para definir mejor la variación del ángulo de fase se presentan en forma particular las gráficas individuales para algunos de los sismos más importantes.

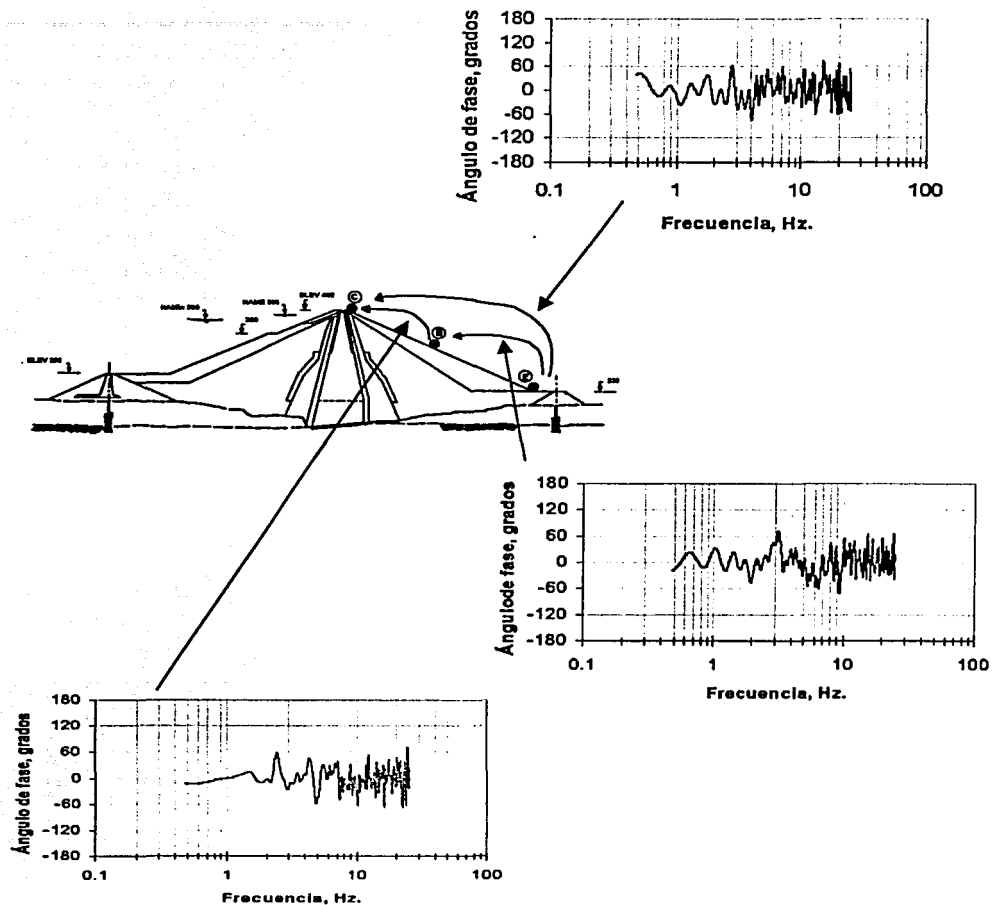


Fig. 3.17 Ángulo de fase en la cortina para el sismo 49

El desfaseamiento de la base a la corona no sobrepasa los 80° , se puede ver un estándar de valores menores a 60° menos en la frecuencia de 4Hz, de igual manera para media cortina a corona donde no se rebasan los 60° y de base a media cortina donde en puntos muy específicos rebaso los 60° .

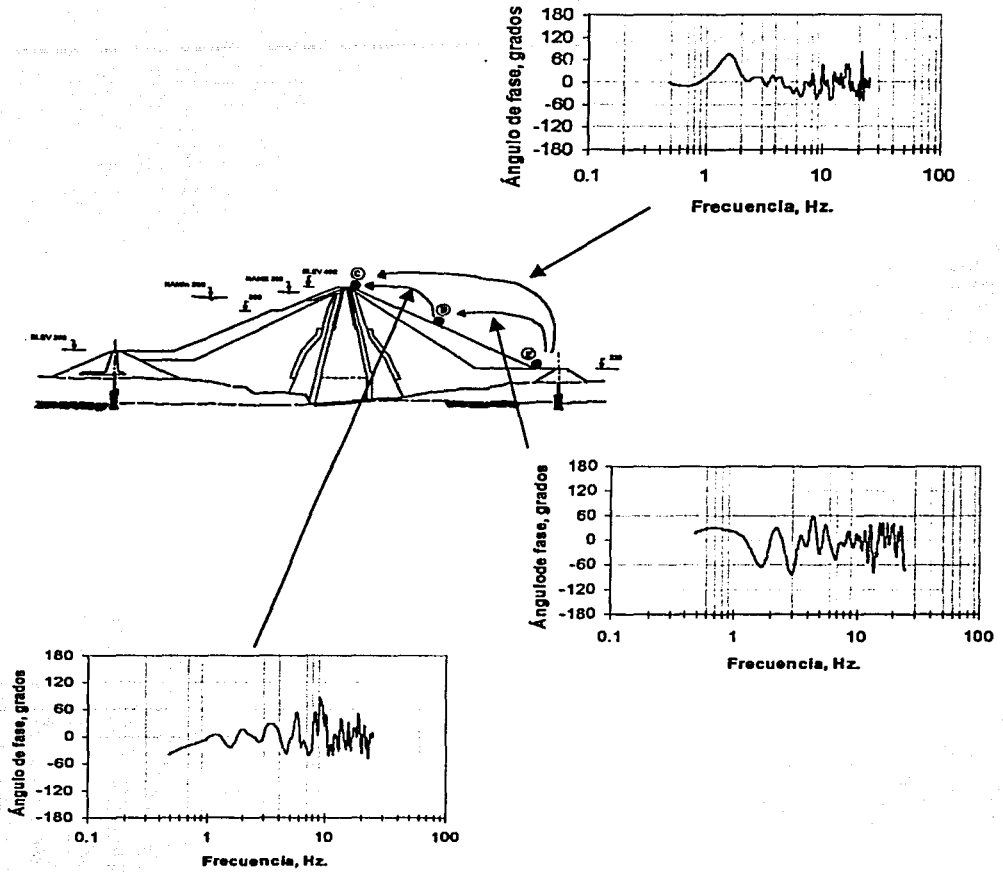


Fig. 3.18 Ángulo de fase en la cortina para el sismo 9

Una vez más podemos hacer notar que de base a corona los movimientos no rebasan los 80° , lo que nos hace observar que la cortina tiene en contenido de frecuencias movimientos constantes que no producen desfases importantes.

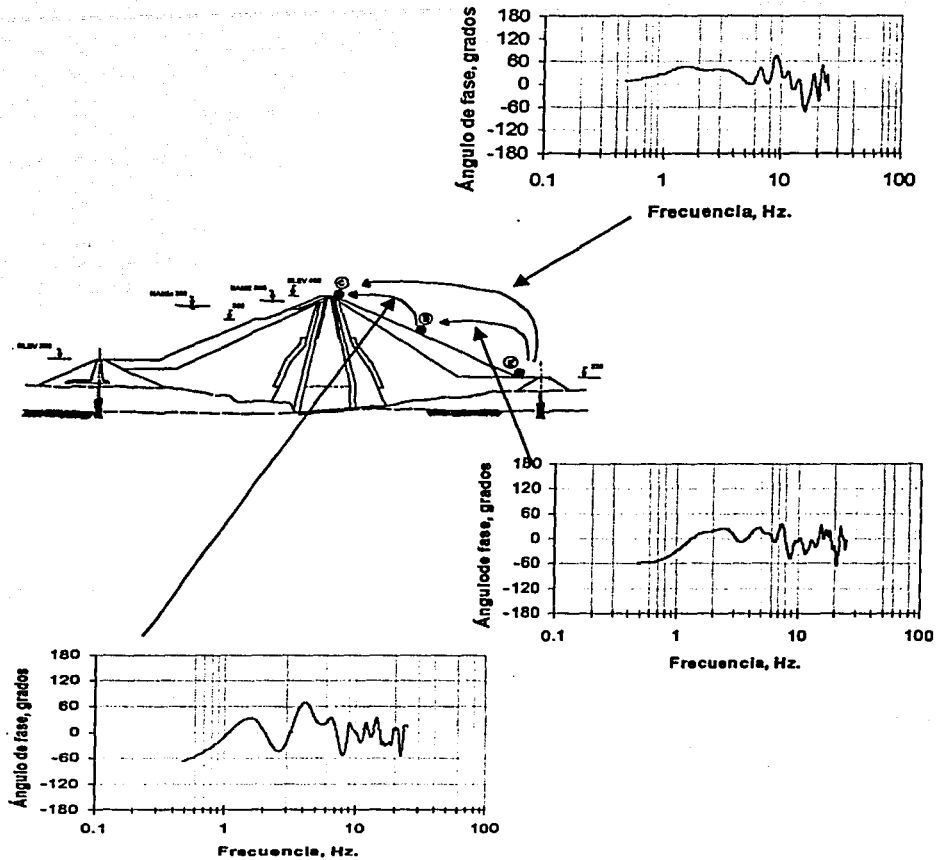


Fig. 3.19 Ángulo de fase en la cortina para el sismo 6

A diferencia de los sismos anteriores en estas funciones podemos observar que los movimientos son largos en el contenido de frecuencias pero lo más interesante es que no se rebasan los 60° en ninguna frecuencia.

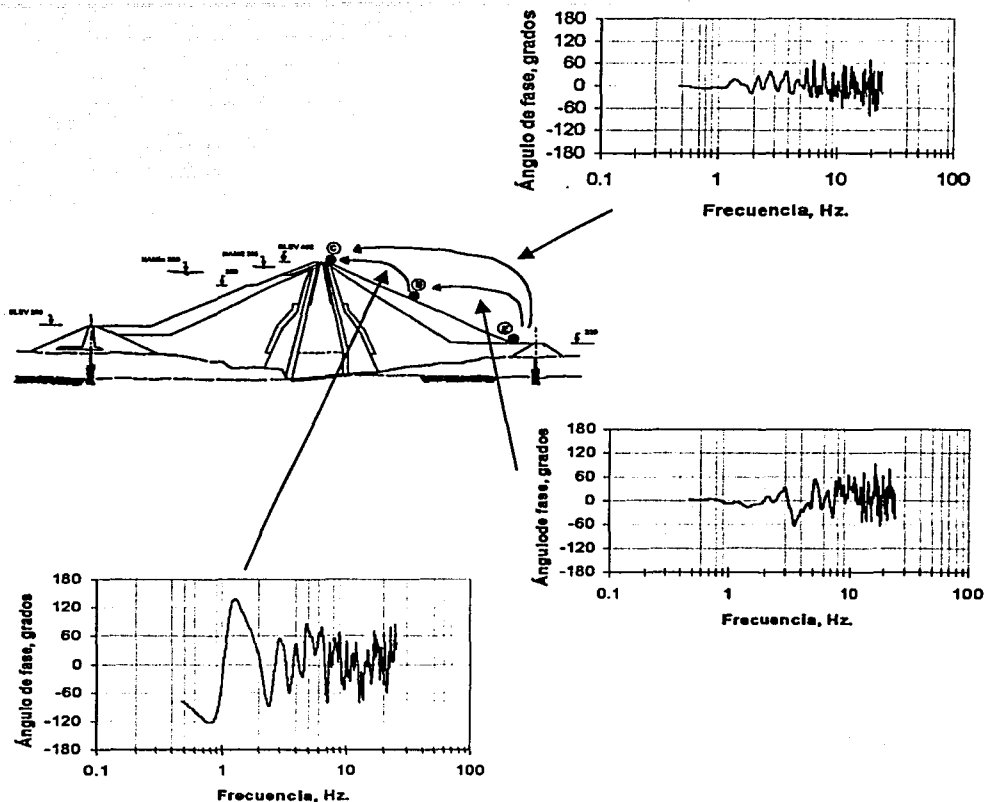


Fig. 3.20 Ángulo de fase en la cortina para el sismo 36

En los ángulos de fase de media cortina a corona podemos observar que los movimientos son mayores 100° en todos los casos, pero que de base a cortina y de base a media cortina no se rebasan los 80° , lo que nos indica que el movimiento fue más importante en la parte superior de la cortina, sin perder de vista que la intensidad es igual para toda la presa.

Con los resultados hasta aquí discutidos es fácil concluir que las características de vibración de la presa reflejan a la cortina como un medio formado por dos cuerpos en los que el movimiento ocasionado por los sismos provoca respuestas diferentes. Mientras que el cuerpo inferior vibra como un medio rígido, el superior lo hace en forma más flexible. Este fenómeno es provocado principalmente por la configuración del cañón, la distribución de los materiales que la conforman y la geometría de la cortina.

Por otro lado, aún cuando la cantidad de sismos estudiados es considerable falta información de sismos de magnitud importante. Hay que recordar que en el capítulo 1 se indicó que sólo 9 sismos registrados tuvieron magnitud mayor a 6° Richter, de los cuales sólo uno es el más importante (sismo 49).

CONCLUSIONES

En algunos estudios se ha observado que el número más importante de fallas en presas se ha debido a problemas geotécnicos más que a la ocurrencia de un sismo, entre las fallas más frecuentes tenemos la tubificación de la cimentación, tubificación del terraplén, rebosamiento, deformación excesiva, deslizamientos o grandes distorsiones plásticas por esfuerzo cortante en la cortina o en su cimentación, pérdida del bordo libre por asentamientos causados por compresión volumétrica de la cortina o de la cimentación, licuación o pérdida parcial de resistencia de la cimentación o de materiales constitutivos de la cortina, agrietamiento transversal o longitudinal de las porciones impermeables de la cortina o la cimentación, falla de la cortina causada por la oscilación del agua embalsada por cambios de nivel del fondo del embalse o por derrumbes de laderas en el embalse, corte de la cortina por deslizamiento a lo largo de las fallas geológicas, erosión, deterioro y entre las mas bajas se encuentran los sismos.

La vibración cíclica que presenta la cortina no deteriora la resistencia de los materiales involucrados.

No existen fallas por deslizamiento por lo que podemos afirmar que no existen grietas que pudieran provocar con el agua de lluvia un empuje que incremente las fuerzas actuantes, o agrietamiento transversal que incremente el gasto de filtración, que pueden provocar los cambios consecuentes de erosión interna.

No existe agrietamiento longitudinal, que es el mayor riesgo por el corazón impermeable de la presa, esto se determina por la deformación vertical diferencial de la sección transversal de la cortina, estas deformaciones son producidas por el arribo no simultaneo de las ondas sísmicas a los distintos puntos de la base, (deformaciones diferenciales transitorias), o por la compactación diferencial de la cimentación durante un sismo (deformaciones diferenciales permanentes).

Las vibraciones están dentro de fase en diferentes zonas de la cortina por lo que no existe agrietamiento transversal en la cortina podemos observar que las aceleraciones máximas de respuesta y la flexibilidad decrecen hacia la corona, por lo que no hay posibilidad de agrietamiento considerable.

Las aceleraciones sísmicas al actuar sobre el embalse generan oscilaciones del agua almacenada. Se ha especulado sobre la probabilidad de que la amplitud de tales oscilaciones representen un peligro de desbordamiento, esto parece poco probable en vista de que los periodos de las excitaciones sísmicas son siempre mucho menores que los naturales de los embalses, y que la duración de los sismos no es suficientemente larga para generar una serie de oscilaciones del embalse en fase con las del sismo. Ambos hechos eliminaban la posibilidad de grandes amplificaciones del movimiento.

Podemos afirmar que la presa Chicoasén no ha sufrido daños bajo sismos de intensidades de 6 grados, podemos observar que en tres elevaciones de la cortina para una aceleración horizontal cercana a los 0.03 gals. en la base la amplificación de la aceleración normal a la corona no rebasa 2.5.

La instrumentación de presas tiene tres objetivos principales:

Asegurar que la estructura opera dentro de los límites de seguridad requeridos, mediante la auscultación continua de su estado para detectar cualquier cambio o anomalía importante e intervenir oportunamente para anticipar la ocurrencia de fallas manteniendo los índices o valores de riesgo dentro de los límites aceptables.

Verificar que el comportamiento observado está de acuerdo con lo esperado en el diseño, revisando si los métodos y procedimientos utilizados durante la construcción son los adecuados y evaluando la influencia de los cambios en el diseño durante la construcción.

Obtener conocimientos aplicables al diseño de nuevas estructuras, permitiendo validar tanto los resultados de nuevos modelos y métodos de análisis como la influencia en el comportamiento para el empleo de nuevos materiales o procedimientos constructivos.

Se debe esperar que bajo sismos intensos, los materiales de la cortina entren al intervalo de comportamiento francamente no lineal y que los amortiguamientos equivalentes sean mayores.

Los registros instrumentales de respuesta a los sismos estudiados indican claramente que la presa Chicoasén dista de comportarse rígidamente (una cortina rígida daría una aceleración de respuesta constante, independientemente de la elevación, y de la excitación).

Las características de vibración de la presa reflejan a la cortina como un medio formado por dos cuerpos en los que el movimiento ocasionado por los sismos provoca respuestas diferentes. Mientras que el cuerpo inferior vibra como un medio rígido, el superior lo hace en forma más flexible. Este fenómeno es provocado principalmente por la configuración del cañón, la distribución de los materiales que la conforman y la geometría de la cortina. Esta respuesta de la cortina pudo observarse en los espectros de respuesta, en los ángulos de fase, en las funciones de transferencia y en las funciones de coherencia.

Por otro lado, aún cuando la cantidad de sismos estudiados es considerable falta información de sismos de magnitud importante. Hay que recordar que en el capítulo 1 se indicó que sólo 9 sismos registrados tuvieron magnitud mayor a 6° Richter, de los cuales sólo uno es el más importante (sismo 49).

BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara L., Javier c., (1993), "Análisis de los registros obtenidos en las estaciones acelerográficas Villita Corona y Villita testigo", Memorias de x Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México.
- Ambraseys N. N., (1960), " On the Seismic Behavior of Earth Dams", Geotechnique, Vol. 18, No.3, pag.181-213.
- Ambraseys N. N., Sarma S. K., (1967), " The response of Earth Dams to Strong Earthquakes", Proceedings II World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 1, Tokio, pag.331-356.
- CFE, (1980), "Comportamiento de las Presas El Infiernillo y La Villita incluido el sismo de Marzo 14, 1979", CFE, México.
- CFE, (1985), "Comportamiento de las Presas Construidas en México", Contribución al XV Congreso Internacional de Grandes Presas, Vol. 2, Lousanne, Suiza.
- Clough R. W., (1961), "Dinamic Effects of Earthquakes", Trans, ASCE, Vol. 126, Parte II, pag. 847-876.
- Figueroa J., (1970) "Catálogo de sismos ocurridos en la República Mexicana actualizados hasta 1983", Publicación Núm. 272 del Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D. F.
- Gazetas G., Debchaudhury A., Gasparini D. A., (1981), "Random Vibration Analysis for the Seismic Response of the Earth Dams", Geotechnique 31, No. 2, pag. 261-277.
- Gutenber B. y Richter C. F., (1954), "Seismicity of the Earth", Pricenton Press, Pricenton, N. J., U. S. A.
- Hernández Reginaldo, (1989), "Respuesta Dinámica en las Presas en boquilla Triangular", Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D. F.
- Hernández Reginaldo., (1994), "ANESSE: Programa para el análisis espectral de señales", Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Hernández Reginaldo, (2000), "Comportamiento Sísmico de Presas de Tierra a partir de Prototipos", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D. F.

- León J.L. (1979), "Análisis del comportamiento de la presa La Villita ante dos sismos. Primera Etapa", Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Comisión Federal de Electricidad, México, D.F.
- Marsal, R. J. y Reséndiz N. D., (1983), "Presas de Tierra y Enrocamiento", Editorial Limusa, México, D.F.
- Mejía L., Seed H.B., Lysmer J., (1982), "Dynamic Analysis of Earth Dams in Three Dimensions", J.G.E.D., ASCE, Vol. 108, No. GT12, pag. 1586-1604.
- Mejía L., Seed H.B., (1983), "Comparison of 2-D and 3-D Dynamic Analysis of Earth Dams", J.G.E.D., ASCE, Vol. 109, No. 11, pag. 1383-1398.
- Mononobe N., Tanaka A., Matsumura M., (1936), "Seismic Stability of the Earth Dams, Memorias II" , Congreso Internacional de Grandes Presas, Washington.
- Newland D.E., (1983), "Vibraciones Aleatorias y Análisis Espectral", Editorial A.C., Madrid.
- Newmark N. M., (1965) "Effects of Earthquakes on Dams and Embankment", Geotechnique, Vol. 15, No. 2, pag. 139-173.
- Reséndiz D., Rosenblueth E., Mendoza E. (1972) "Diseño Sísmico de Presas de Tierra y Enrocamiento, Estado del Arte", Instituto de Ingeniería , UNAM, Informe interno No. 300, México.
- Reséndiz D., Romo M.P., (1972), "Analysis of Embankment Deformations", Proc of the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structure, Purdue, Ind., pag. 817-836.
- Robson J.D., (1963), "An introduction to Random Vibration" University of Edinburgh.
- Romo M.P., Macedo G., (1986), "Comportamiento Dinámico de la Presa La Villita", Sismos de 1985: Casos de Mecánica de Suelos, Septiembre de 1986, México, D. F.
- Romo M.P., Ayala G., Reséndiz D., Díaz C., (1980), " Respuesta Dinámica de las Presas El Infiernillo y La Villita", Comportamiento de las Presas El Infiernillo y la Villita incluido el sismo de Marzo 14, 1979, CFE, México.
- Romo M. P., Magaña R. T., Hernández R. Reginaldo., (1990), "Efecto Tridimensional en la Respuesta Sísmica de Presas", Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, San Luis Potosí, Vol. II.

- Romo M. P., Flores R., (1991), "Análisis de la Respuesta sísmica de Presas de Tierra: Experiencias en México", IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Vía del Mar, Chile, pag. 1257-1278.
- Romo M.P.,Hernández Reginaldo.,(1992), "Comportamiento Dinámico de Presas", Reporte del Instituto de Ingeniería a la Comisión Federal de Electricidad.
- Romo M. P., Magaña R. T., Hernández R. Reginaldo., (1990), "Seismic Response Analysis of El Infiernillo and La Villita Dams", Volumen Marsal, México, D.F.
- Sarma S. K., (1975), "Seismic Stability of Earth Dams and Embankments", Geotechnique, Vol. 25, No. 4, pag. 743-761.
- Seed, H.B., Idriss I.M. y Kiefer, F.M., (1969), "Characteristics of Rock Motion During Earthquakes", J.S.M.F.D., ASCE, Vol. 95, No. SM5.
- Seed, H.B., Duncan, J.M. e Idriss I.M., (1975), "Criteria and Methods For Static and Dynamic Analysis of Earth Dams", In Criteria and Assumption for Numerical Analysis of Dams, Swansea, University College, Pag. 564-588.
- SRH-CFE-UNAM (1976), "Comportamiento de Presas Construidas en México", Contribución al XII Congreso Internacional de Grandes Presas, México.
- Xiangyue Li (1984) "Modificación de espectros Sísmicos por la influencia de las Condiciones Locales". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F.
- Ramírez González Luis Raymundo "Análisis Sísmico de la Presa Trigomil". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F.
- Marín Bonilla Arturo "Evaluación de la seguridad Sísmica de las presas de tierra y enrocamiento de la C.N.A. Vicente Guerrero, Gro., Ing. Aurelio Benassini Vizcaino, Sin., y el Carrizo, B.C.N". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F.