

01161
6
29



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA DE TRES TIPOS DE BASES PARA ESTACIONES ACELEROGRAFICAS

T E S I S

PRESENTADA A LA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
(ESTRUCTURAS)

POR
MARIO SALOME RAMIREZ CENTENO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CIUDAD UNIVERSITARIA

OCTUBRE DE 1994



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

Dedico este trabajo:

A ti, Señor, por la oportunidad de la vida.

A mis padres, con todo mi amor. Gracias.

A mis tíos, por su ejemplo de vida y apoyo en momentos difíciles.

A mis hermanos, por compartir parte de su vida conmigo.

A mi familia y amigos todos.

A mis compañeros en el área de estructuras de la UAM: Jorge, Manuel, Eduardo, Hugón, Alonso, Bernardo, Emilio, Alejandro, Amador, Marco y especialmente a Jesús Iglesias, por el apoyo y la confianza brindada.

A David Murià, Mario Chávez, Jaime Grabinsky, Gustavo Ayala y Jesús Iglesias, por compartir sus conocimientos y tiempo conmigo al revisar este trabajo.

A la Universidad Autónoma Metropolitana.

A los habitantes de zonas sísmicas.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS DE INTERACCION SUELO- ESTRUCTURA DE TRES TIPOS DE BASES PARA ESTACIONES ACELEROGRAFICAS

1.- INTRODUCCION 1

2.- ESTACIONES ACELEROGRAFICAS 4

- 2.1.-Descripción de las estaciones acelerográficas nacionales / 4
- 2.2.-Propuesta de estaciones acelerográficas para el estudio / 12
- 2.3.-Diseño y construcción / 19
- 2.4.-Características locales del terreno /19

3.- METODOLOGIA EXPERIMENTAL 22

- 3.1.- Excitación ambiental / 22
- 3.2.- Excitación forzada / 26

4.- ANALISIS DE SEÑALES 36

- 4.1.- Acelerogramas / 36
- 4.2.- Espectros de respuesta / 40
- 4.3.- Espectros de Fourier / 40
- 4.4.- Intensidad de Arias / 40

5.- RESULTADOS 42

- 5.1.- Coeficiente de correlación entre espectros de Fourier / 42
- 5.2.- Coeficientes de correlación entre espectros de respuesta / 44
- 5.3.- Cociente de la intensidad de Arias / 45
- 5.4.- Cociente de las aceleraciones máximas /45
- 5.5.- Función de transferencia / 48
- 5.6.- Función de coherencia / 55

6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 62

REFERENCIAS 68

LISTA DE FIGURAS 70

1.- INTRODUCCION

Durante los sismos de septiembre de 1985 la ciudad de México sólo contaba con 11 acelerógrafos, de los cuales tres se ubicaban en la zona del antiguo lago, y únicamente uno dentro de la zona que sufrió los mayores daños. La información derivada de los macrosismos fue muy limitada, lo cual motivó la instalación de varias redes acelerográficas con características técnicas variadas que a la fecha suman más de un centenar de estaciones pertenecientes a distintas instituciones entre las que destacan la Fundación ICA, la Fundación Javier Barros Sierra, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM).

La instalación de estos aparatos en la ciudad ha permitido el registro de varios sismos posteriores a 1985 en muy diversas zonas del valle y su análisis ha ayudado a comprender mejor el comportamiento dinámico del subsuelo de la ciudad de México.

En particular, la UAM motivada por el gran interés en la instrumentación para el estudio del suelo de la ciudad de México, inició el proyecto de la "Red de Instrumentación Sísmica de la UAM" para el registro de movimientos fuertes, que en su primera etapa estableció la colocación de tres acelerógrafos instalados en cada una de las tres unidades de la UAM. La ubicación de estos sitios corresponden en la parte sur y oriente de la ciudad a las unidades Xochimilco e Iztapalapa respectivamente y en el norte, a la unidad Azcapotzalco.

La mayoría de los acelerógrafos instalados en la ciudad de México corresponden a los clasificados como de campo libre, que son los que se colocan sobre el terreno en sitios suficientemente alejados de edificios, construcciones o instalaciones que pudieran perturbar el movimiento natural del terreno.

Existen también aparatos instalados directamente sobre algunas estructuras o bien los de pozo profundo, colocados en el subsuelo a distintas profundidades. Las estaciones acelerográficas de campo libre están constituidas, además del acelerógrafo, por una base hecha

normalmente con concreto reforzado, en la que se fija el equipo; sobre la base también se desplanta una caseta que brinda protección física al acelerógrafo y dentro de la cual se alojan además equipos menores e instalaciones auxiliares.

El concepto de estaciones de campo libre se basa en el hecho de que el comportamiento dinámico de una construcción durante un sismo influye en el movimiento del terreno, alterando las características dinámicas naturales del mismo en la vecindad de la estructura. La discrepancia entre ambos movimientos se debe al fenómeno conocido como Efecto de Interacción Suelo-Estructura (EISE); así, cuando se desea conocer la respuesta del subsuelo ante un evento sísmico, se instala una estación acelerográfica de campo libre con el objeto de evitar en lo posible los EISE.

Sin embargo, se ha encontrado que los EISE no sólo pueden ser importantes por la presencia de estructuras cercanas, sino que también pueden serlo por la existencia misma de la estación en el terreno. El grado de influencia de los EISE debidos a la estación acelerográfica depende, entre otros factores, de la geometría de la cimentación, la profundidad de la misma, el peso de la estación, así como de las características geotécnicas del terreno y de la caracterización dinámica del movimiento (Alcántara *et.al.*, 1989), (Crouse, 1984).

Se han logrado identificar dos mecanismos que describen los efectos de interacción suelo-estructura (Bycroft, 1978). En primer término, el movimiento del terreno es alterado al modificarse el estado de esfuerzos del suelo como consecuencia del peso que le transmite una cimentación; este movimiento modificado se transmite a su vez a la cimentación. En segundo lugar, cuando las dimensiones de la cimentación son del mismo orden o mayores que la longitud de las ondas de cortante sísmicas existirá un movimiento diferencial del terreno en el contorno de la cimentación, dado que ésta es más rígida que el suelo, lo que provoca que la cimentación experimente un movimiento alterado, diferente del natural. Estudios recientes (Chávez^(b) *et.al.*, 1989, 1991) han logrado calcular amplificaciones de hasta un orden de magnitud para frecuencias superiores a 10 Hz en las

funciones de transferencia medidas en algunas estaciones acelerográficas en terreno blando en la ciudad de México.

Debido a la diversidad de características de las estaciones acelerográficas en la ciudad, resulta de gran interés el estudio de los EISE en las estaciones de cuyos registros se obtienen las historias de aceleraciones, velocidades y desplazamientos, así como el periodo natural del suelo y los espectros de respuesta, a partir de los cuales se construye el espectro de diseño para las construcciones.

El objetivo de este trabajo es el estudio experimental de los EISE en tres prototipos de bases para estaciones acelerográficas ubicadas en terrenos de transición de la ciudad de México. Para ello se realizó la construcción de tres bases de concreto armado con diferente geometría en la Unidad Azcapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana, en terrenos clasificados como de transición por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, RCDF-87 (DDF, 1987).

Se efectuaron mediciones de vibración sobre las bases y en el terreno "libre", mediante sismógrafos y acelerógrafos con los cuales pudo registrarse la respuesta dinámica de las primeras y el segundo cuando fueron excitadas, primero, por la vibración ambiental y después, por vibración forzada, utilizando para esto último un compactador neumático de tierra.

A partir de los registros en el dominio del tiempo pudieron obtenerse los espectros de Fourier, así como los espectros de respuesta de las diversas señales. Se calcularon los coeficientes de correlación entre los espectros de Fourier, así como entre los espectros de respuesta. Se obtuvieron además los cocientes de la intensidad de Arias de los acelerogramas entre cada base y el terreno, y los cocientes de las aceleraciones máximas. Finalmente se obtuvieron las funciones de transferencia y las funciones de coherencia entre las bases y el terreno. Con estos resultados fue posible la caracterización de los efectos de interacción suelo-estructura para las bases en estudio, a fin de elegir la más adecuada.

2.- ESTACIONES ACELEROGRAFICAS

2.1 Descripción de las estaciones acelerográficas nacionales

La instrumentación sísmica en México se inicia en 1910 con la fundación del Servicio Sismológico Nacional del Observatorio de Tacubaya en la ciudad de México, a partir de la instalación de dos sismógrafos de periodo corto, aún en operación.

En la década de los sesentas, a raíz del sismo de 1957, se inicia la instrumentación para el registro de movimientos fuertes y con ello la necesidad de fijar y proteger los equipos utilizados. En su mayoría, los primeros instrumentos fueron alojados dentro de estructuras existentes, y unos cuantos en estaciones del tipo de campo libre, aunque con la tendencia a construir estaciones a base de concreto reforzado y mampostería, de dimensiones grandes.

La década de los ochentas, particularmente a raíz del sismo de 1985, coincide con el gran crecimiento en la instrumentación de movimientos fuertes en la ciudad de México, la aparición de los acelerógrafos digitales y la consiguiente reducción en el tamaño de los equipos. Inician además las tendencias a reducir el tamaño y peso de las estaciones mediante la sustitución de las casetas de mampostería por casetas metálicas y la reducción de las dimensiones de la cimentación.

En la actualidad muchos de los antiguos equipos analógicos han sido sustituidos por modernos equipos digitales; sin embargo, no se percibe la misma velocidad en el cambio hacia estaciones acelerográficas cuyas características geométricas y de peso generen menores EISE. La variedad en las características geométricas y constructivas de las estaciones es amplia. A continuación se describen algunas de las estaciones existentes en México.

a) Caseta rectangular de mampostería y concreto reforzado.

Este tipo de estación se caracteriza por una caseta rectangular de mampostería con techo de concreto armado con dimensiones en planta de 1.40m x 3.20m y 1.90m de altura a partir del nivel de piso terminado. La base es una losa maciza de concreto reforzado dentro de la cual se desplanta el equipo a 1.30m de profundidad respecto del nivel del terreno. Un ejemplo de este tipo de estación se localiza dentro de la Ciudad Universitaria, en la ciudad de México (Chávez et.al., 1991), figura 1.

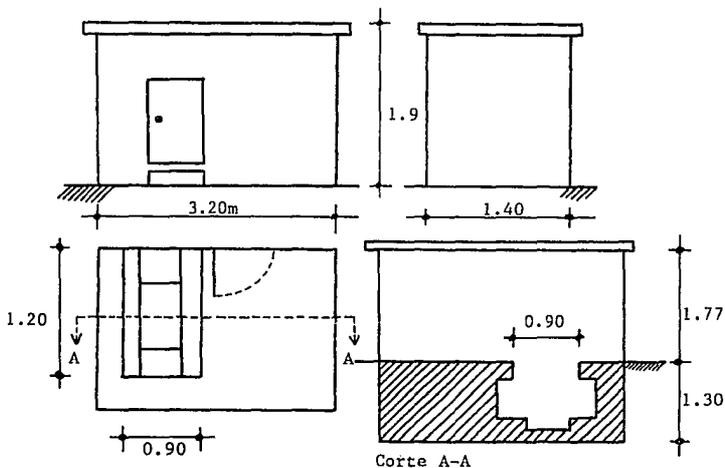


Figura 1.-Caseta rectangular de mampostería y concreto reforzado

b) Caseta rectangular de concreto reforzado totalmente enterrada.

En este tipo de estaciones, los muros, la base y techo son de concreto reforzado con espesor entre 0.15m a 0.20m y dimensiones en planta de 1.50m x 2.50m y profundidad de 3.00m y se encuentra totalmente enterrada. Sobre la base y al centro de la estación posee un pedestal formado por tres placas de concreto reforzado con altura de 0.80m sobre el nivel de piso terminado sobre el cual se ancla el equipo. Algunas estaciones de este tipo se ubican en la ciudad de Puebla, Puebla, figura 2.

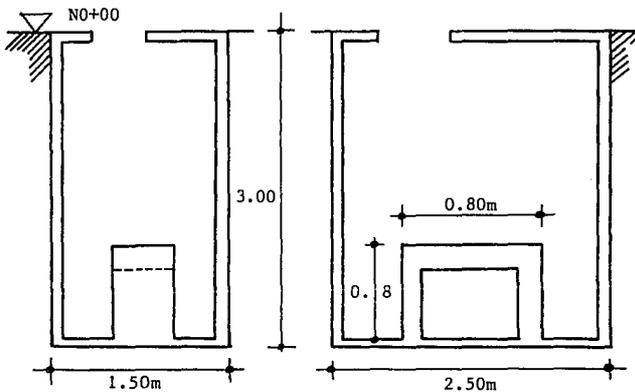


Figura 2.- Caseta rectangular de concreto reforzado totalmente enterrada.

c) Estación cilíndrica de concreto reforzado parcialmente enterrada.

El diámetro de la estación es 2.50m y tiene 1.50m de altura, de los cuales 1.00m queda bajo en nivel del terreno. Este tipo de estaciones son utilizadas por la Fundación ICA (Otero, 1991), figura 3.

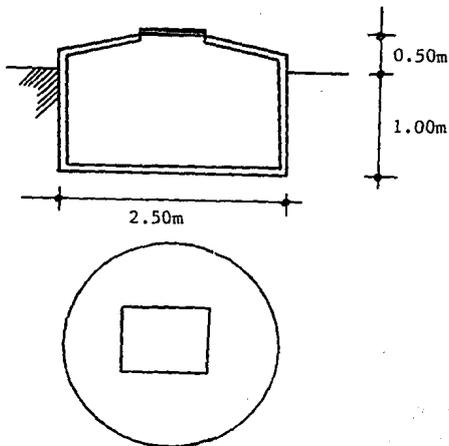


Figura 3.- Estación cilíndrica de concreto reforzado parcialmente enterrada.

d) Estación rectangular a base de concreto armado.

Esta se caracteriza por una caseta de concreto armado con dimensiones de 0.95m x 0.80m en planta, con una altura total de 1.35m y espesor de 0.12m. La base es de concreto reforzado de 0.45m de espesor de los cuales 0.40m están por debajo del nivel del terreno. Un ejemplo es la estación viveros en la ciudad de México. (Chávez^(a) et.al.,1989), figura 4.

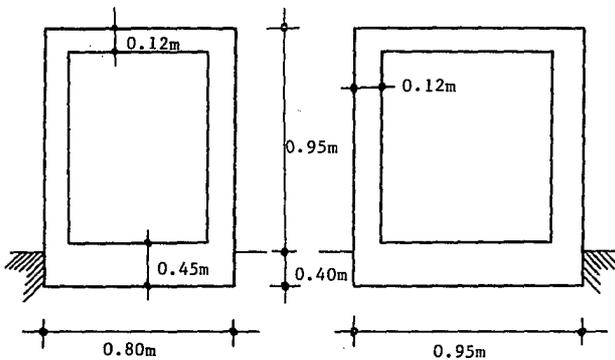


Figura 4.- Estación rectangular a base de concreto armado.

e) Caseta metálica anclada en un cajón hueco de concreto reforzado.

La cimentación es una caja hueca de concreto reforzado de 0.90m x 1.08m y 1.30m de altura, de los cuales 1.00m está enterrado. El espesor de las paredes laterales e inferior es de 0.15m, en tanto que la losa tapa tiene un grosor de 0.30m. Sobre esta losa se ancla una caseta metálica hecha con lámina de acero de 4mm de espesor y 0.45m de altura. La estación de SCT es un ejemplo típico. (Chávez⁽⁶⁾ et.al., 1989), figura 5.

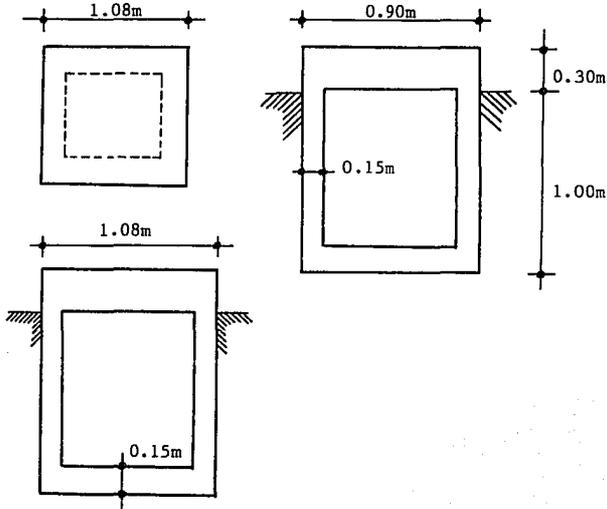


Figura 5.- Caseta metálica anclada en un cajón hueco de concreto reforzado.

f) Caseta metálica alta y base de concreto armado.

Las dimensiones de este tipo de casetas metálicas son 2.20m x 1.50m y altura variable, anclada a un sistema de losa y contratrabes de concreto armado, que constituye la base de la estación. Algunas de estas estaciones cuentan con un acelerógrafo de pozo profundo ubicado debajo de la caseta. Este tipo de estaciones son utilizadas por el CENAPRED en la red de atenuación sísmica y en la red de la ciudad de México (Quaas *et.al.*, 1991), figura 6.

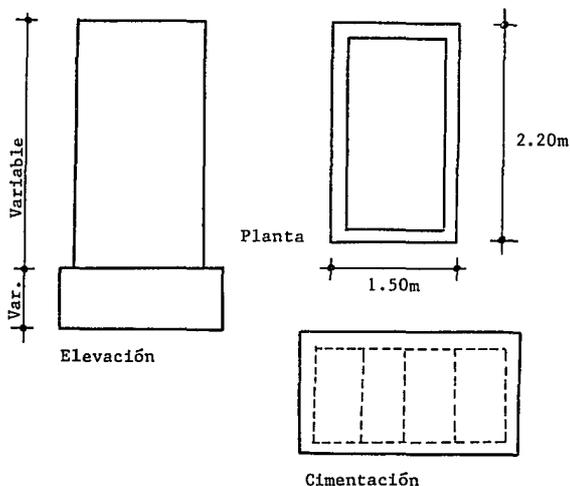


Figura 6.- Caseta metálica alta y base de concreto armado.

g) Caseta metálica baja y base de concreto reforzado.

Sus dimensiones en planta son variables: desde 0.80m hasta 1.20m. Su base, de concreto reforzado, consiste en una losa rectangular o cuadrada con espesor entre 0.20m y 0.40m en cuyo perímetro se proyecta hacia el terreno una contratabe con profundidad no mayor a 1.00m. Pueden presentar también la contratabe en cruz al centro. Algunas estaciones presentan una base cúbica y maciza de concreto reforzado. Sobre la base de concreto se ancla una caja metálica con altura no mayor a 0.50m hecha con placa metálica de 4mm. Estaciones de este tipo son utilizadas por la Fundación Javier Barros Sierra, figura 7.

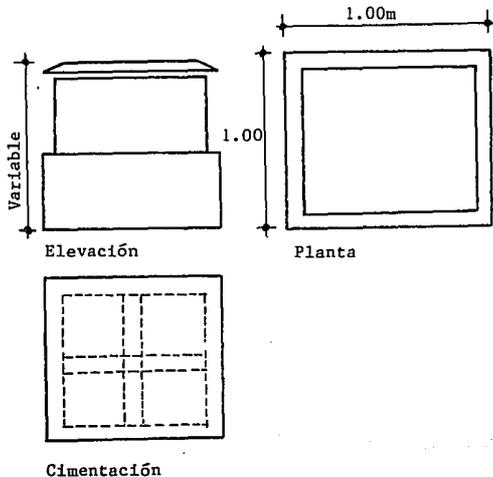


Figura 7.- Caseta metálica baja y base de concreto reforzado

2.2 Propuesta de estaciones acelerográficas para el estudio.

De acuerdo con los factores que generan los EISE, la condición ideal sería aquella en la que el peso de la estación compensara el peso del suelo removido por la construcción y cuyas dimensiones fueran mucho menores que la longitud de las ondas de cortante en el terreno (Bycroft, 1978). Adicionalmente debería lograrse que el amortiguamiento del sistema base-suelo fuese similar al del sistema suelo sin base.

En la práctica, lo recomendable sería la elección de las menores dimensiones posibles de la base que, junto con un tipo de caseta ligera, resulten en un menor sobrepeso, pero garantizando las condiciones necesarias de operación, mantenimiento y seguridad del equipo.

Internacionalmente existe la tendencia a disminuir el peso y dimensiones de las estaciones. En México, como se vio anteriormente, algunas instituciones utilizan estaciones ligeras con base de concreto de dimensiones reducidas y caseta metálica baja.

Tomando en cuenta la diversidad de estaciones existentes en el país y el interés que surgió en la UAM por definir las características más adecuadas de las bases de las estaciones acelerográficas para su red de instrumentación, en este trabajo se estudian los efectos de interacción en tres bases diferentes de concreto reforzado, sin caseta, todas con dimensiones en planta de 1.05m x 1.05m. La base tipo "A" representa la tendencia actual para la construcción de bases para estaciones acelerográficas en México, las que fueron descritas en el inciso 2.1.g. La base tipo "B" se propuso con el objeto de valorar el efecto del peso en la generación de los EISE, ya que es una propuesta mucho más ligera que las otras dos. En la base tipo "C" se estudió el efecto del nivel de desplante en la generación de los EISE. A continuación se describen sus características:

Base tipo "A": Formada por una losa de concreto reforzado de 0.20m de espesor, anclada con una contratrabe perimetral de cimentación cuya profundidad es de 0.50m bajo el nivel del terreno. El espesor de la contratrabe es de 0.15m. El peso estimado de la base es de 1177 kg y el nivel de desplante del acelerógrafo se ubica 0.20m sobre el nivel del terreno, figura 8.

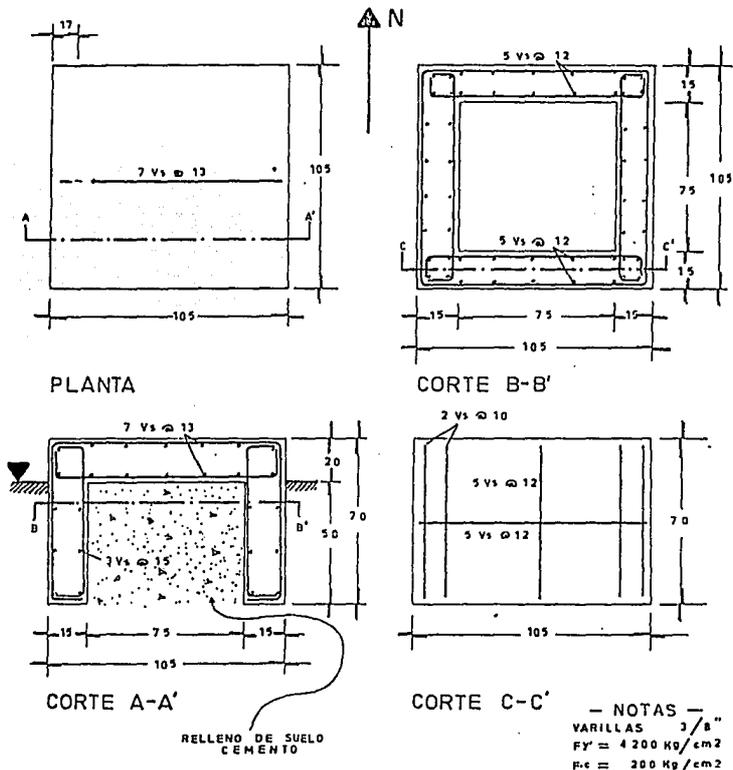


Figura 8.-Base tipo "A"

Base tipo "B": Está formada por una losa de concreto reforzado de 0.20m de espesor, anclada al terreno por 4 postes de concreto reforzado de 0.15m x 0.15m x 0.50m de profundidad bajo el nivel del terreno. El nivel de desplante del acelerógrafo se ubica 0.20m sobre el nivel del terreno. El peso estimado de esta base es de 638 kg, figura 9.

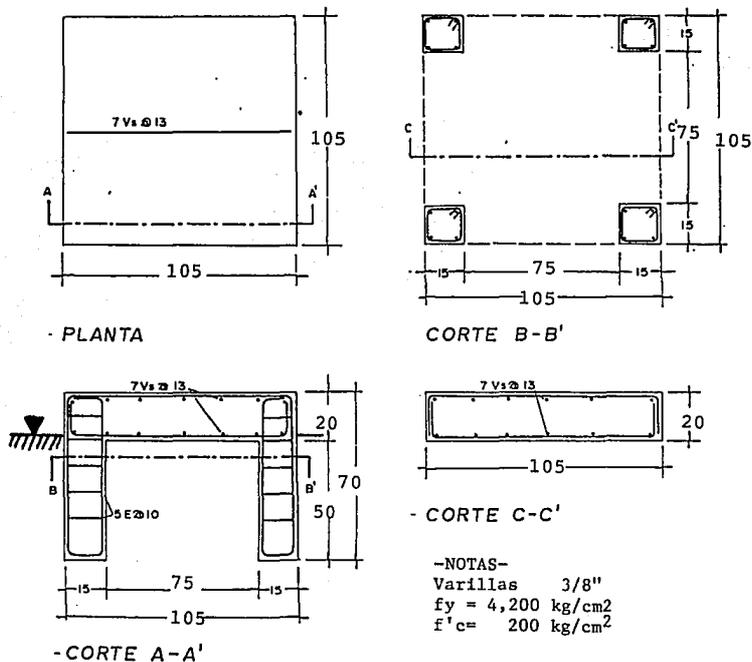
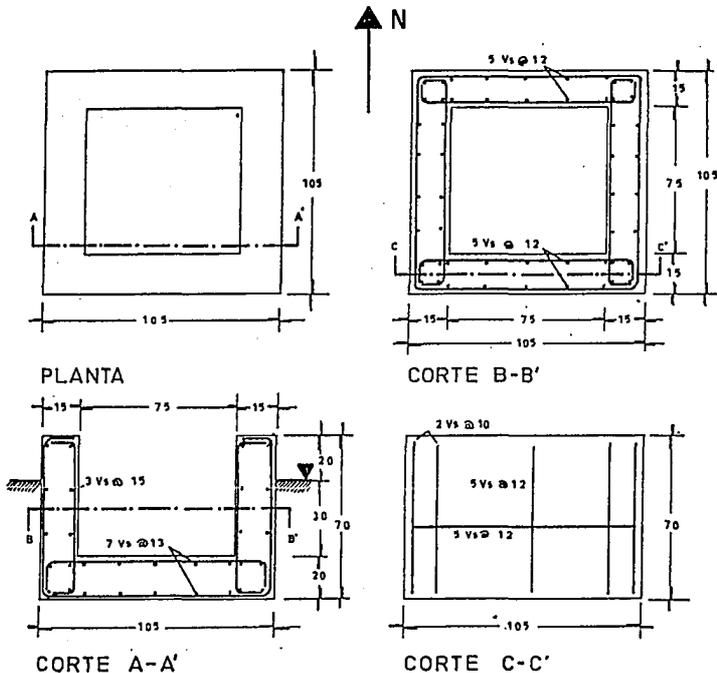


Figura 9.- Base tipo "B"

Base tipo "C": Está formada por una losa de concreto reforzado de 0.20m de espesor cuyo nivel de piso terminado se ubica a 0.30m bajo el nivel del terreno. Sobre la losa se desplanta una contratrabe perimetral de concreto reforzado de 0.15m de espesor, que sobresale 0.20m sobre el nivel del terreno. El peso estimado de la base es de 1177 kg, figura 10.



-NOTAS-
 Varillas 3/8"
 $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$
 $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$

Figura 10.- Base tipo "C"

Durante la etapa experimental las tres bases no incluyeron la caseta metálica, por lo que es posible que su posterior presencia altere los EISE en la estación definitiva, por lo que en una etapa posterior a este estudio se incluirá el efecto de la caseta metálica sobre los EISE. La caseta metálica se fijó sobre la base una vez identificada la más adecuada. La caseta está formada con lámina galvanizada de 4mm de espesor y dimensiones en planta de 0.95m x 0.95m y 0.50m de altura y un peso aproximado de 120 Kg.

Las tres bases se ubican dentro de la Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, en terrenos de transición de acuerdo al RCDF-87 (figura 11). Las bases están construidas en una área verde, donde las estructuras más cercanas son dos edificios de cuatro niveles, uno a 30m al norte y otro a 25m al poniente de las bases (figura 12). Las tres bases están alineadas y la distancia entre sus ejes es de 3m (figura 13).

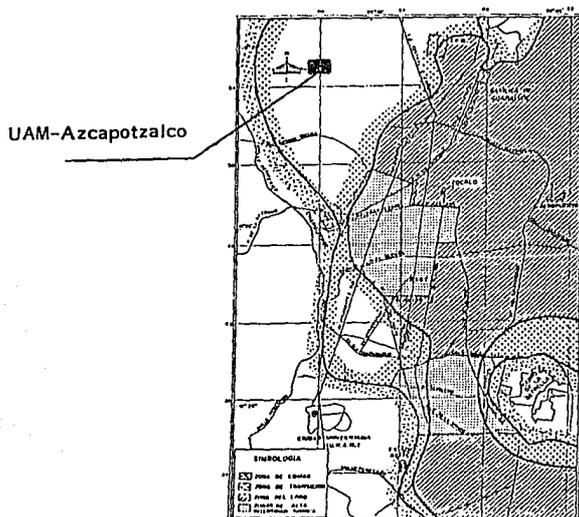


Figura 11.- Ubicación del sitio de las pruebas (UAM Azcapotzalco)

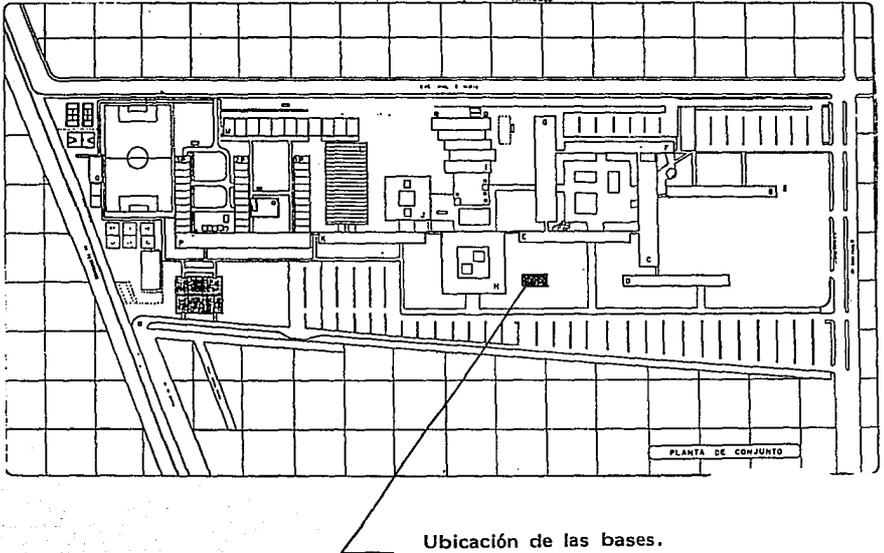


Figura 12.- Ubicación de las bases dentro de la Unidad Azcapotzalco.

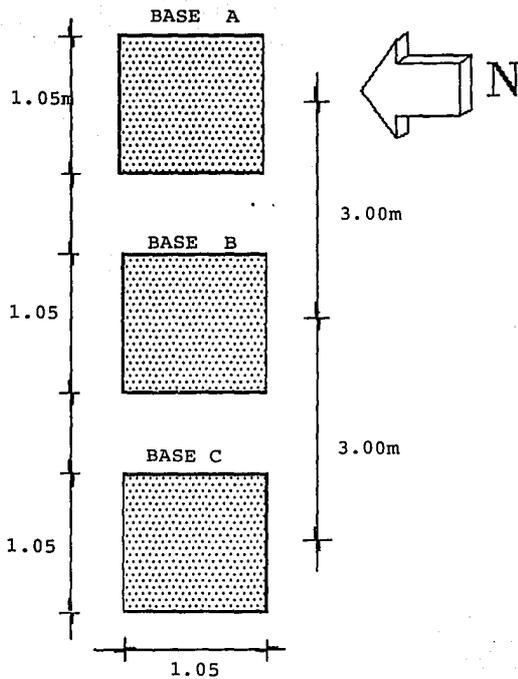


Figura 13.- Ubicación relativa de las bases

2.3 Diseño y construcción.

Una vez definidas la geometría y las dimensiones de las bases, el armado se calculó con base en el refuerzo mínimo de acuerdo con el RCDF-87, y su distribución se especifica en las figuras 8 a 10. Con el objeto de tener un buen contacto entre el suelo y la base, la excavación se llevó a cabo en forma cuidadosa, lo que evitó el uso de cimbra en las caras en contacto con el terreno. El concreto utilizado se dosificó para lograr una resistencia de 200 Kg/cm². En el caso de la base tipo A, el núcleo del suelo bajo la losa se mejoró usando suelo-cemento. Para ello se agregó al material producto de la excavación 5% de cemento y 5% de cal. La mezcla en seco se colocó en capas de 10 cm, agregando el agua requerida y compactando con pisón de mano. Para el caso de la base B, sólo se removió la capa vegetal bajo la losa, además de las perforaciones para ubicar los postes.

2.4 Características locales del terreno.

Las estaciones se ubican en 19.52 Lat N., 99.19 Long W. De acuerdo con el estudio de mecánica de suelos (Geosol, 1992) efectuado a través de tres sondeos en una zona ubicada aproximadamente a 150m de las bases, el suelo está formado básicamente por tres estratos (figura 14). El superior está formado por un conjunto de capas limo-arenosas, medianamente compactas, con espesor de 4.5m, y cuya resistencia a la penetración estándar varía entre 10 y 45 golpes. El estrato intermedio tiene un espesor aproximado de 5m y está constituido por arcillas de origen lacustre, muy compresibles, blandas y de alta plasticidad. Presenta de 2 a 10 golpes en la prueba de penetración estándar. El último estrato está formado nuevamente por arenas y limos arenosos compactos, con resistencia a la penetración estándar de 20 a más de 50 golpes, con una tendencia a aumentar la resistencia con la profundidad. Este estrato llega hasta el final del sondeo. El nivel freático se localizó a 2.70m respecto del nivel del terreno.

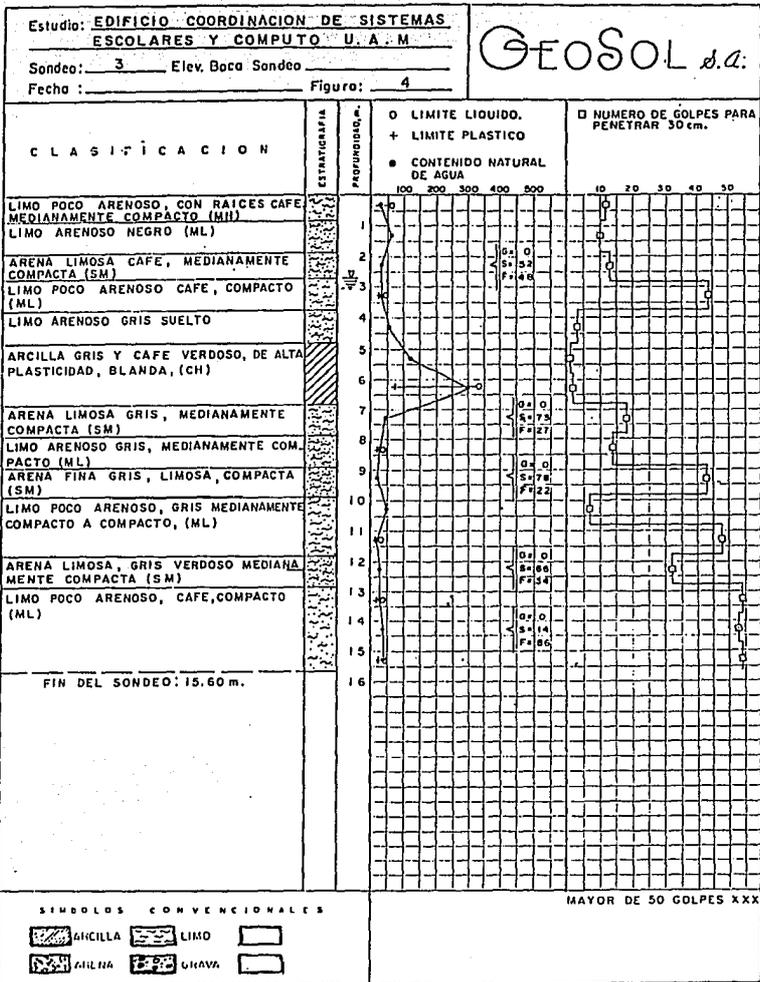


Figura 14.- Estratigrafía del suelo en la zona de pruebas.

De acuerdo con el RCDF-87 el periodo natural de vibración del terreno en la zona es de 0.60 seg, en coincidencia con las pruebas efectuadas por Lermo (Lermo et.al., 1988) mediante el análisis de la vibración ambiental. Se calculó la velocidad media de propagación de las ondas de cortante con base en la expresión:

$$V_s = (G'/\rho)^{1/2}$$

Donde G' es el Módulo de cortante dinámico y ρ es la densidad del suelo. Así analizando para cada estrato se tiene:

ESTRATO	G' (MPa)	ρ (Kg/m ³)	V_s (m/s)	Espesor (m)
1	16	1500	103.27	4.5
2	12	1200	100.00	5.0
3	20	1500	115.47	11.00

Pudo así determinarse una velocidad de propagación de ondas de cortante promedio $V_s = 106.42$ m/s y dado que el valor del periodo en el sitio es de 0.6 seg, la longitud media de onda es:

$$L_w = T_s V_s = 63.85\text{m}$$

garantizándose con ello que las dimensiones de las bases son mucho menores que la longitud de las ondas de cortante, por lo que es posible despreciar su contribución a la generación de los EISE.

3.- METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Excitación ambiental.

Se efectuaron mediciones de vibración ambiental sobre las bases y el terreno con el objeto de determinar los EISE de las bases ante este tipo de excitación. A continuación se describe la metodología seguida:

Descripción del equipo.

a) Grabadora digital de estado sólido Kinematics modelo SSR-1 con las siguientes características:

No. de canales:	6
Velocidad de muestreo:	1000 mps con un canal. 200 mps con seis canales.
Resolución:	16 bits.
Filtro anti-alias:	5, 15 y 50 Hz.
Memoria:	1 megabyte, equivalente a 14 minutos utilizando 3 canales a 200 mps.

b) Tres sensores sismológicos Kinematics modelo WR-1 con conversión en la salida a voltajes, proporcionales simultáneamente a velocidades y aceleraciones. Sus principales especificaciones técnicas son:

Sensor:	Velocidad y aceleración.
Ancho de banda:	0.2 a 20 Hz.
Sensitividad:	$\pm 2.5V/\pm 0.01g$
Frecuencia natural:	20 Hz.
Amortiguamiento:	70% del crítico

c) Dos acelerógrafos uniaxiales Kinematics modelo FBA-11

Escala completa:	$\pm 1.0g$
------------------	------------

Frecuencia natural 50 Hz.
Amortiguamiento 70 % del crítico.

d) Computadora portátil Acer Notebook 80386 a 20 MHz, 1 Mb de memoria RAM y 60 MB en disco duro.

e) Programas de cómputo:

Comunicaciones: Quick Talk. Programa general de comunicaciones

Graficación: Quick Look. Programa de graficación de eventos.

Ubicación de sensores y arreglo general

Se colocó un sensor WR-1 sobre cada una de las bases y directamente sobre el terreno despalmado se colocaron dos sensores FBA-11 con el propósito de registrar el movimiento testigo o de referencia. Los cinco sensores se colocaron horizontalmente orientando el sentido positivo de todos en forma perpendicular al eje común de las bases, es decir, hacia el Sur (figuras 15 y 16). Se conectaron los cinco sensores a la grabadora digital. En la tabla 1 se muestra la correspondencia de los sensores con el número de canal.

Punto	Canal	Tipo sensor	No. serie
Terreno A	1	FBA-11	28802
Terreno B	2	FBA-11	28804
Base C	4	WR-1	116
Base B	5	WR-1	117
Base A	6	WR-1	112

Tabla 1.- Ubicación de sensores para el experimento con vibración ambiental.

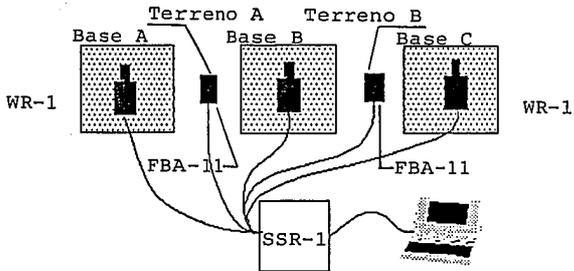


Figura 15.- Arreglo de los sensores sobre las bases en el experimento de vibración



Figura 16.- Vista del arreglo de los sensores para vibración ambiental .

Descripción del procedimiento de registro.

Previo al registro se calibraron los sensores y se eligió a través de programas de cómputo (Kinematics, 1989) el filtro tipo Butterworth que filtra las frecuencias superiores a 15 Hz, con el objeto de eliminar las frecuencias altas asociadas con el tráfico de vehículos, maquinaria, etc. Se registraron 12 eventos con los cinco canales trabajando simultáneamente, cada uno con duración de 30 segundos, con una velocidad de muestreo de 200 mps.

Con el objeto de determinar el periodo natural de vibración del conjunto base-terreno y del propio terreno, en una etapa posterior se efectuaron mediciones de vibración ambiental en cada una de las bases y en el terreno, utilizando dos sensores WR-1 en posición horizontal, orientados ortogonalmente entre sí. Con esta disposición se registraron 10 eventos por cada canal con una duración de 30 segundos cada uno. En la figura 17 se presenta una muestra de las señales registradas ante vibración ambiental en el dominio del tiempo.

3.2 Excitación forzada.

Además de registrar la vibración ambiental, se obtuvieron registros de vibración forzada, con el objeto de determinar, en primer lugar, los posibles efectos de interacción ante un movimiento más intenso que el ambiental y, en segundo lugar, poder comparar el grado de los EISE en función del tipo de vibración.

Se efectuaron para ello mediciones de vibración forzada sobre las bases y en el terreno. Para ello se provocó una excitación artificial por medios mecánicos, generando aceleraciones correspondientes a movimientos más intensos que la vibración ambiental. El proceso seguido se describe a continuación:

Descripción del equipo:

- a) Cinco acelerógrafos triaxiales Kinematics modelo SSA-2 cuyas características son:
- Sensores: 3 internos colocados ortogonalmente: longitudinal, vertical y transversal.
 - Sensitividad: $\pm 2.5V/\pm 1.0g$

ESTUDIO DE BASES PARA ESTACION ACC.
VIBRACION AMBIENTAL, SSR-1 134

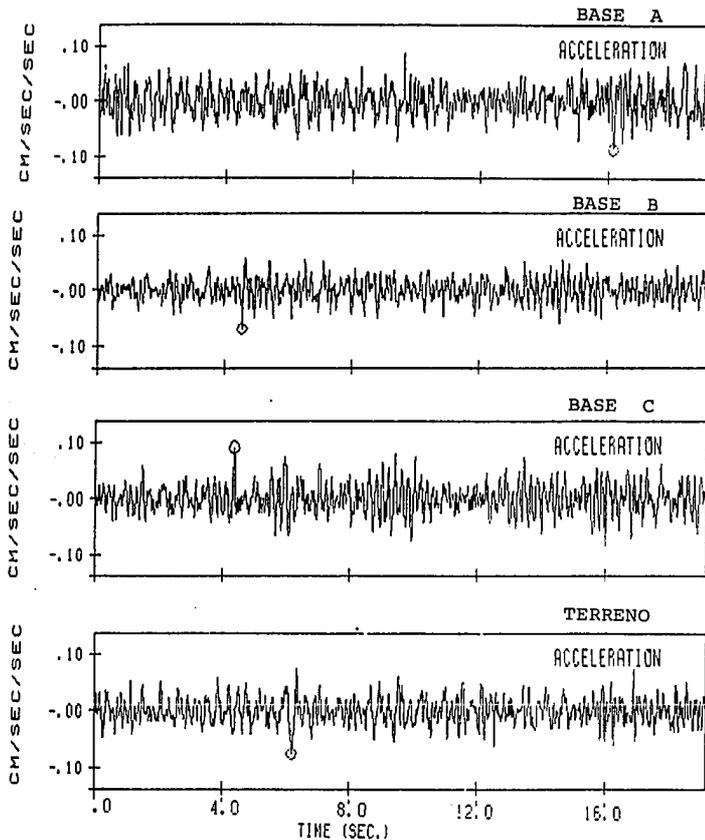


Figura 17.- Muestra de la señal en el dominio del tiempo del experimento ante vibración ambiental.

Frecuencia natural: 50 Hz.
Amortiguamiento: 70 % del crítico
Ancho de banda: 50 Hz.
Muestreo: 200 mps por canal
Resolución: 12 bits
Capacidad de registro: Aproximadamente 10 minutos en 3 canales

b) Computador portátil Acer Notebook 80386, 20 Mhz, 1 Mb de memoria RAM y 60 Mb en disco duro.

c) Programas de cómputo:

Comunicaciones: Quick Talk (QTSSA) versión 1.0

Graficación: Quick Look (QLSSA)

Elección de la fuente de excitación

Uno de los primeros aspectos a considerar fue el modo de aplicar la vibración y los medios requeridos para ello. En primer lugar se juzgó necesario efectuar pruebas preliminares de vibración que permitieran la elección de la fuente. A continuación se describen las alternativas consideradas y las observaciones obtenidas de las mediciones preliminares de vibración:

a) Primera alternativa. En primera instancia se planteó la posibilidad de utilizar el registro de la vibración provocada por el impacto en el terreno de un lingote de acero de 50 kg cuando se le dejaba caer de una altura aproximada de 1m y a distancias de 5m y 10m de las bases. Al analizar los registros producidos por el impacto, pudo observarse que las aceleraciones máximas registradas se presentaban en el canal vertical y no sobrepasaban los 4 gals. Esto provocó que se desechara este método; sin embargo, durante la prueba pudo observarse un comportamiento diferente entre las bases, dado que en la base tipo "C" se presentaron aceleraciones inferiores a las observadas en las otras dos. En esta etapa los acelerógrafos no estaban interconectados para tener un disparo simultáneo, sino que el

registro se iniciaba independientemente en cada aparato al sobre pasarse los umbrales de disparo, fijados en tres gals para todos los acelerógrafos. Pudo registrarse el movimiento provocado por el impacto en los aparatos colocados tanto en el terreno como en las bases "A" y "B", pero en la base "C" sólo se logró el disparo al provocar el impacto a 2m de distancia.

b) Segunda alternativa. Posteriormente se intentó provocar el movimiento a través de una mesa vibratoria eléctrica para bloques de concreto. Se registró la señal en las bases y en el terreno y se observaron aceleraciones inferiores a dos gals, aún a distancias muy cortas a la fuente, menores que 2m, lo que descartó este método para la prueba de vibración forzada.

c) Tercera alternativa. Finalmente se optó por provocar la vibración mediante el uso de un compactador de tierra neumático de gasolina con el cuál pudieron provocarse aceleraciones máximas de hasta 100 gals antes de filtrar, por lo cual se adoptó esta alternativa para provocar el movimiento forzado. El equipo utilizado es un compactador marca Dynapac CM 22 cuyas principales características son:

Peso en servicio:	95 kg
Frecuencia máxima de vibración:	4,500 Hz
Velocidad máxima del motor:	3,600 RPM
Potencia del motor:	5 HP

Descripción del arreglo de sensores.

Se colocó un acelerógrafo sobre cada una de las bases y dos sobre el terreno. Se orientó el canal transversal de todos en forma perpendicular al eje común de las bases (figuras 18 y 19). La fijación de los equipos a las bases se efectuó por medio de un taquete de 1/4" colocado en el centro de la base, mientras que la fijación de los acelerógrafos ubicados sobre el terreno, previamente despalmado, se efectuó por medio de bandas elásticas sujetas a anclas clavadas en el suelo. Posteriormente, se efectuó la calibración de los sensores. Con el objeto de lograr el disparo simultáneo de los

equipos, se armaron cinco juegos de cables que permitieron la interconexión en serie de los mismos. En la tabla 2 se indica la ubicación de los cinco acelerógrafos.

Punto	Tipo sensor	No. Serie
Terreno A	SSA-2	168
Terreno B	SSA-2	112
Base C	SSA-2	170
Base B	SSA-2	169
Base A	SSA-2	167

Tabla 2.- Ubicación de acelerógrafos para vibración forzada.

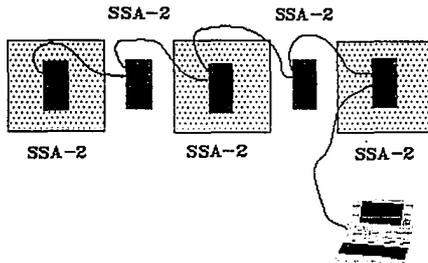


Figura 18.- Arreglo de acelerógrafos para el experimento ante vibración forzada .

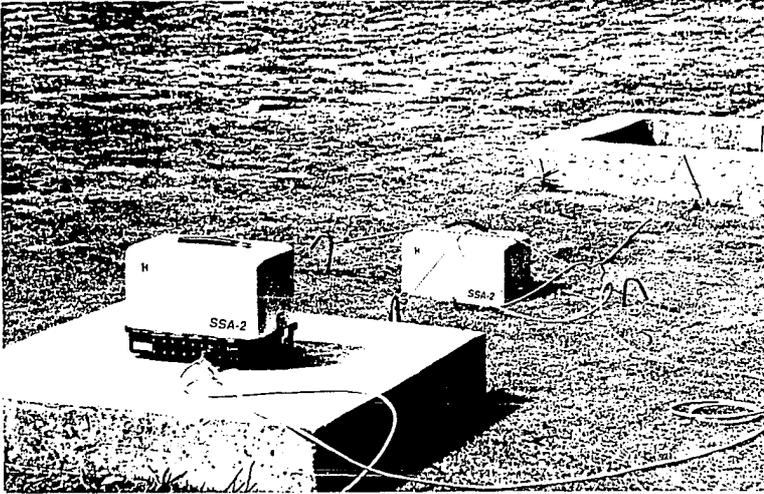


Figura 19.- Vista del arreglo de los acelerógrafos para el experimento ante vibración forzada

Descripción del procedimiento de registro.

En la planeación del registro con vibración forzada se consideraron dos variantes asociadas a la fuente:

- 1) Variación en la frecuencia.
- 2) Variación en la ubicación de la fuente.

La variación en la frecuencia fue regulada al hacer variar la velocidad del apisonamiento del compactador y pudieron establecerse dos condiciones de frecuencia. En la primera, se fijó la máxima velocidad posible de golpeo que llamaremos en este trabajo "frecuencia alta". En la segunda, se utilizó la mínima velocidad posible, llamada "frecuencia baja". En las figuras 20 y 21 se muestran los espectros de Fourier correspondientes a los eventos registrados sobre el terreno "A" en las frecuencias alta y baja respectivamente.

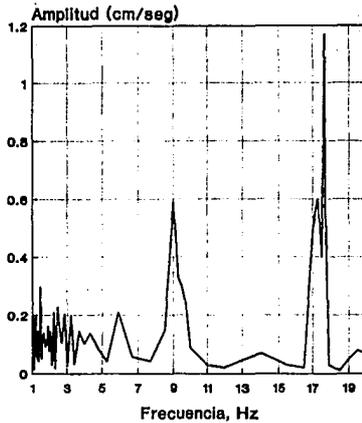


Figura 20.- Espectro de Fourier para el caso de vibración forzada alta.

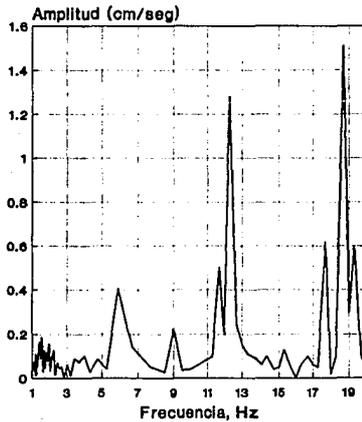


Figura 21.- Espectro de Fourier para el caso de vibración forzada baja.

A partir de los espectros de Fourier se desprende que para el caso de "frecuencia baja", el contenido de frecuencias se concentra en tres zonas básicamente : 5.7, 12.11 y 18 Hz, en tanto que para la "frecuencia alta", el contenido de frecuencias se agrupa en dos zonas: 8.9 y 17.77 Hz. Considerando que la banda de interés para el trabajo varía entre 1 y 10 Hz, es posible identificar una frecuencia básica inferior de 5.7 Hz así como otra superior de 8.9 Hz.

En cuanto a la posición del compactador, ésta se hizo variar respecto a la base B, considerándose dos distancias: 5m y 10m (figura 22).

La combinación de todas estas variantes arroja las cuatro alternativas de registro en vibración forzada estudiadas:

- Fuente a 5m con frecuencia baja
- Fuente a 5m con frecuencia alta
- Fuente a 10m con frecuencia baja
- Fuente a 10m con frecuencia alta

Para cada una de estas combinaciones de frecuencia y distancia se obtuvieron los registros simultáneos del movimiento sobre las bases y el terreno. En cada caso y para cada combinación se registraron 12 eventos con una duración de 30 seg en los tres canales: longitudinal, vertical y transversal. Con fines de control se le asignó a cada registro una clave que permitiera identificarlo. En la tabla 3 se presentan las claves y su identificación:

Si se consideran los 12 registros con duración de 30 seg para los 5 aparatos, cada uno con tres sensores, y cuatro combinaciones de excitación, se registraron en total 360 minutos de vibración forzada, es decir 6 horas de registro. Esta información fue transferida al computador portátil y respaldada en disquetes para su posterior análisis. En la figura 23 se presenta una muestra de la señal registrada sobre cada base y sobre el terreno para el caso de frecuencia baja a 5m.

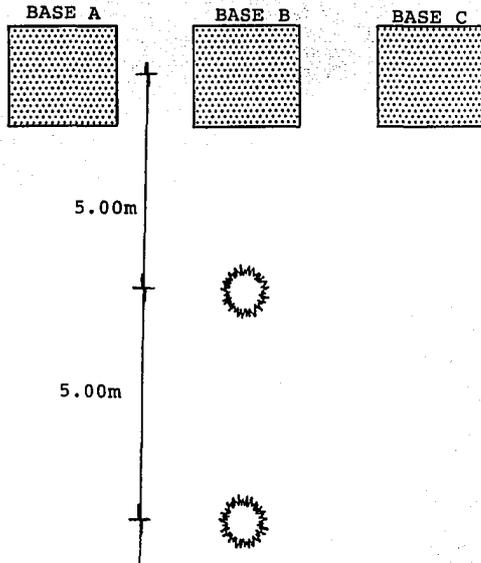


Figura 22.- Ubicación de la fuente de vibración forzada,

CLAVE	PUNTO	DISTANCIA	FRECUENCIA	NO.EVENTOS
BA5FA	BASE A	5.00	ALTA	12
BA5FB	BASE A	5.00	BAJA	12
BA1FA	BASE A	10.00	ALTA	12
BA1FB	BASE A	10.00	BAJA	12
BB5FA	BASE B	5.00	ALTA	12
BB5FB	BASE B	5.00	BAJA	12
BB1FA	BASE B	10.00	ALTA	12
BB1FB	BASE B	10.00	BAJA	12
BC5FA	BASE C	5.00	ALTA	12
BC5FB	BASE C	5.00	BAJA	12
BC1FA	BASE C	10.00	ALTA	12
BC1FB	BASE C	10.00	BAJA	12
TA5FA	TERRENO A	5.00	ALTA	12
TA5FB	TERRENO A	5.00	BAJA	12
TA1FA	TERRENO A	10.00	ALTA	12
TA1FB	TERRENO A	10.00	BAJA	12
TB5FA	TERRENO B	5.00	ALTA	12
TB5FB	TERRENO B	5.00	BAJA	12
TB1FA	TERRENO B	10.00	ALTA	12
TB1FB	TERRENO B	10.00	BAJA	12

Tabla 3.-Claves de eventos en vibración forzada.

ESTUDIO DE BASES PARA ESTACION ACC.
VIBRACION FORZADA, SSA-2

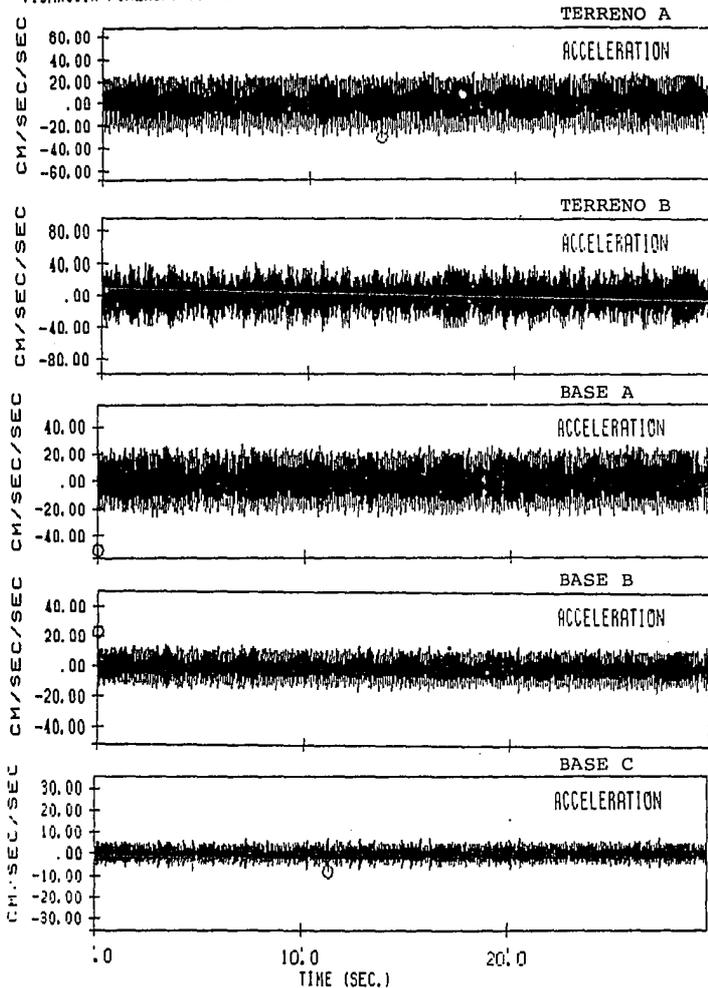


Figura 23.- Muestra de la señal en el dominio del tiempo del experimento ante vibración forzada.

4.- ANALISIS DE SEÑALES

El criterio de comparación adoptado en este trabajo es el de cotejar la respuesta de cada base con la del terreno, que se considera como la respuesta testigo o de referencia. Los parámetros a comparar son las señales mismas, los espectros de Fourier, los espectros de respuesta, la intensidad de Arias y las aceleraciones máximas registradas.

4.1.- Acelerogramas.

Los registros provenientes de los experimentos ante vibración ambiental y forzada se transfirieron a una computadora donde fueron procesados. Se utilizó para ello el paquete Seismic Workstation Software, SWS-1 (Kinemetrics, 1989). Para la obtención de los acelerogramas se siguieron tres etapas:

a) Conversión al formato común.

La primera etapa, una vez adquiridos y almacenados los registros fue la conversión al formato común requerido por el paquete SWS-1. Esto se logra a través de los programas CNVSSR para los datos adquiridos con la grabadora digital SSR-1 y de CNVSSA para los registros provenientes de los acelerógrafos SSA-2.

b) Conversión a unidades de aceleración.

En esta etapa los datos binarios en unidades de voltaje son convertidos al formato requerido por las siguientes dos etapas, es decir a aceleraciones. Esto se logra con el programa VOLIDS, para lo cual es necesario definir los parámetros de sensibilidad, frecuencia natural y amortiguamiento que para cada sensor son requeridos en la siguiente etapa.

c) Corrección, filtrado e integración del acelerograma.

Consiste en la corrección del registro dadas las características del instrumento; además, durante este proceso fue aplicado un filtro pasabanda tipo Ormsby. Finalmente, a través de la integración del acelerograma corregido y filtrado se obtienen la historia de velocidades y desplazamientos. Se usa para esta etapa el programa VOL2.

Los límites fijados al filtro Ormsby son:

1.0 Hz	Límite inferior
0.1 Hz	Ancho de transición inferior
10.0 Hz	Límite superior
1.5 Hz	Ancho de transición superior

Los límites se fijaron en función del ancho de banda de interés para el estudio, dado que el periodo natural del terreno es de 0.6 seg según el RCDF-87 se consideró de 1.0 Hz a 10.0 Hz. Pudo determinarse la frecuencia natural del terreno obtenida a partir del análisis estadístico de los espectros de Fourier de la señal proveniente de las mediciones de vibración ambiental (figuras 24, 25, 26 y 27) y cuyos resultados se muestran en la tabla 4. Este análisis consistió en la obtención de los espectros de Fourier correspondientes a los 10 registros obtenidos en cada base y sobre el terreno, y a partir de la frecuencia fundamental de vibración observada en cada espectro, se obtuvo la frecuencia promedio para cada base y el terreno. De acuerdo con esto, el periodo natural del terreno es de 0.64 seg, en coincidencia con el RCDF-87.

Con el objeto de establecer la estabilidad del filtro Ormsby, en la figura 28 se muestra la función de transferencia, FT, entre una señal filtrada y una sin filtrar. En el intervalo de 1 a 10 Hz la FT oscila alrededor de 1, mientras que fuera de ese intervalo la respuesta se amortigua sensiblemente, por lo que se consideró adecuado el uso de este filtro.

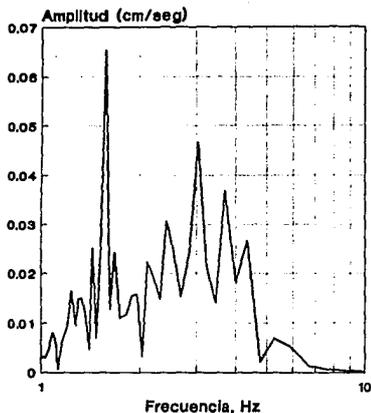


Figura 24.- Espectro de Fourier de un registro de vibración ambiental sobre la base A.

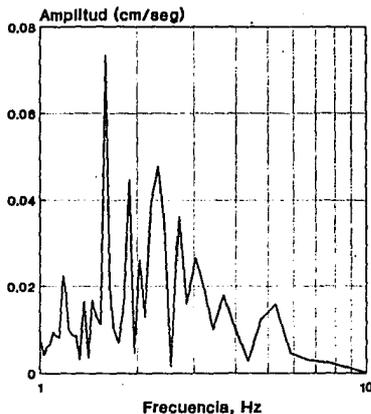


Figura 25.- Espectro de Fourier de un registro de vibración ambiental sobre la base B.

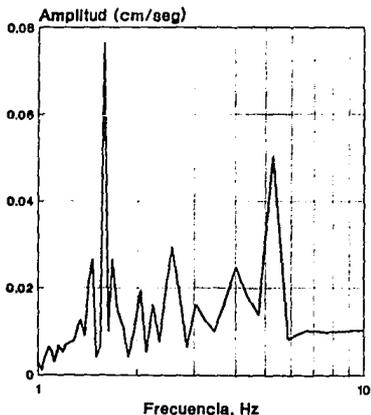


Figura 26.- Espectro de Fourier de un registro de vibración ambiental sobre la base C.

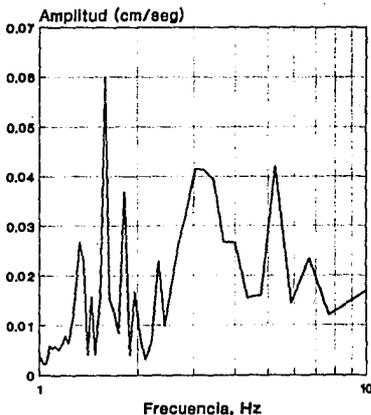


Figura 27.- Espectro de Fourier de un registro de vibración ambiental sobre el suelo.

PUNTO	PERIODO (SEG)
BASE A	0.64
BASE B	0.64
BASE C	0.64
SUELO	0.64

Tabla 4.- Periodos de bases y terreno medidos con vibración ambiental

EFFECTO DEL FILTRO ORMSBY
1.0 A 10.0 Hz

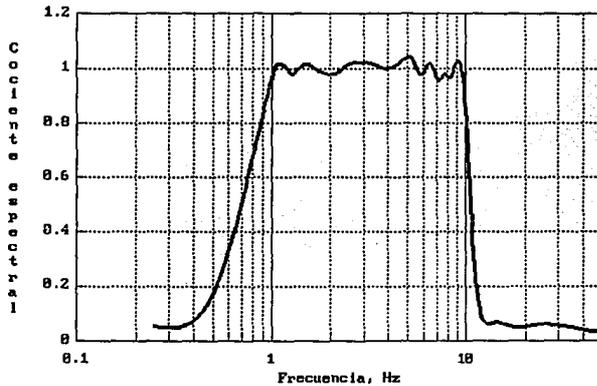


Figura 28.- Función de transferencia entre la señal filtrada y la no filtrada.

4.2.- Espectros de respuesta.

Usando el programa VOL3 se obtuvieron los espectros de respuesta de pseudoaceleraciones de los acelerogramas corregidos y filtrados. Los espectros se calcularon considerando 100 valores de periodo, definidos desde 0.1 a 1.0 seg, con intervalos de 0.01 seg y un amortiguamiento de cero. Ya que para el caso de la vibración forzada es de interés el estudio del comportamiento de las tres bases al sometérselas a aceleraciones altas, sólo se consideraron los canales vertical y transversal en virtud de que el canal longitudinal, perpendicular a la dirección del movimiento, registró aceleraciones mucho menores que las otras dos, con aceleraciones máximas de 10 gals, es decir, 8 veces menor en promedio que las registradas en los otros dos canales, probablemente debido a la direccionalidad del movimiento.

4.3.- Espectros de Fourier.

A través del programa VOL3 también se obtuvieron los espectros de Fourier en el dominio del periodo para los registros provenientes de los dos tipos de excitación. Los espectros de Fourier se definieron para el intervalo que va de 0.1 a 1 seg con $\Delta t = 0.01$ seg.

4.4.- Intensidad de Arias.

La intensidad de Arias (Arias, 1969) representa la energía disipada, por unidad de peso, por un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso como consecuencia de un sismo y es una medida de la capacidad destructiva del mismo. Para evaluar la intensidad de Arias se aplica la expresión:

$$I = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a(t)^2 dt$$

donde:

- a(t) -aceleración en el tiempo t
- t₀ -duración total del acelerograma
- g -aceleración de la gravedad.

Se calcularon las intensidades de Arias para todos los acelerogramas, excepto para el canal longitudinal de la experiencia con vibración forzada.

5.- RESULTADOS

La idea de involucrar a los parámetros en estudio (la señal misma, espectros de Fourier, espectros de respuesta, la intensidad de Arias y las aceleraciones máximas registradas) es la de comparar la distorsión entre cada uno de ellos para poder explorar las repercusiones de los efectos de interacción suelo-estructura en el uso posterior de las señales. Así, la relación directa de las señales mismas aporta un método inmediato de comparación. El cociente entre los espectros de Fourier ha sido una herramienta sismológica tradicionalmente utilizada con el propósito de determinar los EISE. Adicionalmente, se propone la comparación entre los espectros de respuesta con el propósito de determinar las repercusiones de los EISE en este parámetro que es el finalmente usado en el diseño estructural. Además, se consideró de interés determinar la posible distorsión de la intensidad de Arias, que es una medida del potencial sísmico destructivo (energía). Finalmente, se relacionaron las aceleraciones máximas obtenidas sobre las bases y en el terreno, ya que éstos son parámetros muy utilizados para caracterizar los sismos, pero también con el fin de estudiar el efecto de interacción sobre el umbral de disparo de los acelerógrafos.

Para efectuar las comparaciones se consideró la respuesta para cada base y la correspondiente a la del sensor sobre el terreno más cercano. Así, los resultados de la base "A" se compararon con los del terreno "A" y los de la base "C" con los del terreno "B". La base "B" fue comparada con el terreno "A" (figuras 15 y 18).

Es importante tomar en cuenta que la cercanía entre las bases pudo haber influido en la respuesta de estas, por lo que en estudios posteriores se eliminará este factor y se determinará el grado de la interacción base-base generado en este caso.

5.1 Coeficiente de correlación entre espectros de Fourier.

Se calculó el coeficiente de correlación entre los espectros de Fourier en el dominio del periodo para el intervalo de 0.1 a 1 seg con $\Delta t = 0.01$ seg, con el fin de

determinar el grado con el que se relacionan linealmente los espectros obtenidos para las bases respecto de los del terreno. El coeficiente de correlación, r_{xy} , se define como:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

donde x_i , y_i	-series por comparar
x_i	- serie correspondiente a la base
y_i	-serie correspondiente al terreno
\bar{x} , \bar{y}	-promedios de cada serie
n	-número total de puntos = 100

Para cada evento y canal se calculó el espectro promedio, tomando los 12 registros que componen cada evento. Posteriormente se obtuvo el coeficiente de correlación entre el espectro promedio de cada base y el correspondiente del terreno.

5.1.1.- Vibración ambiental.

De acuerdo con la tabla 5 el mejor comportamiento lo presenta la base B, con un coeficiente de correlación de 0.98, mientras que para la base A es de 0.84 y de 0.83 para la base C.

5.1.2.- Vibración forzada.

Para el canal transversal, en la tabla 6 se aprecia que la base B presenta un mejor comportamiento que las bases A y C, y es esta última la que muestra el inferior comportamiento. Las mayores correlaciones se presentan en general para la frecuencia baja, así como en los experimentos con la fuente a 5m.

Para el caso del canal vertical, en la tabla 7 se observa un comportamiento similar entre las tres bases. Las mayores correlaciones aparecen en general para la frecuencia baja y en los experimentos con la fuente a 5m.

5.2.- Coeficientes de correlación entre espectros de respuesta.

Se aplicó el mismo proceso para la obtención de los coeficientes de correlación entre espectros de respuesta, cuyos resultados se muestran en las tablas 5, 6 y 7.

5.2.1.- Vibración ambiental.

La mejor correlación de acuerdo con la tabla 5 se presenta en la base B con una correlación de 0.86, le sigue la base A con $r_{xy} = 0.77$, en tanto que la base C tiene una correlación de 0.67.

5.2.2.- Vibración forzada.

Para el canal transversal, en la tabla 6 se puede observar que el comportamiento de las bases es semejante, con coeficientes de correlación muy altos, sin poder distinguir de entre las bases la que presente un mejor comportamiento. En relación con la frecuencia, no existe una predominancia de los coeficientes en función de ésta. No se observa tampoco la influencia de la distancia a la fuente en los coeficientes de correlación.

En el caso del canal vertical, de la tabla 7 se observan también coeficientes muy altos, sin apreciarse, en general, que alguna de las bases tenga un comportamiento superior a las otras. Lo mismo sucede al considerar la distancia a la fuente y la frecuencia de excitación.

5.3.- Cociente de la intensidad de Arias.

Se calculó el promedio de las intensidades de Arias para cada evento y posteriormente se efectuó el cociente de las intensidades en las bases entre las del terreno.

5.3.1.- Vibración ambiental.

En la tabla 5 se muestra el cociente de los promedios de la intensidad de Arias para cada base. Pudo observarse que la base tipo B tiene un cociente de 1.0, el mejor para las bases, en tanto que para las bases A y C es inferior a 1, siendo la base C la que presenta el comportamiento menos satisfactorio, con 0.21.

5.3.2.- Vibración forzada.

Para el canal transversal, en la tabla 6 puede observarse que en general las bases A y B tienden a amplificar la respuesta, en tanto que la base C la amortigua cuando la fuente se ubica a 10m. Las amplificaciones en general son mayores cuando la frecuencia de excitación es alta. No se aprecia una tendencia definida de los cocientes en función de la distancia.

En el caso del canal vertical, de la tabla 7 puede concluirse que en general la base B se comporta ligeramente mejor, sobre todo cuando la fuente se ubica a 10m. Además, en general, todas las bases amplifican la respuesta cuando la fuente se ubica a 5m. En relación a la frecuencia, no se aprecia ninguna relación clara con los cocientes.

5.4.- Cocientes de aceleración máxima.

Para los acelerogramas de vibración forzada se determinó la máxima aceleración registrada en cada evento y se efectuó el cociente del valor correspondiente a cada base entre el del terreno. En la tabla 6 se muestran los resultados para el canal transversal y se observa que en general la base C muestra cocientes bajos, en tanto que la base B

presenta valores ligeramente superiores a los mostrados por la base A. No se aprecia relación entre la frecuencia y el cociente de aceleraciones máximas; en general, los cocientes son mayores para los eventos con la fuente a 10m.

En el canal vertical, de la tabla 7 puede verse que las bases A y B muestran el mejor comportamiento relativo, en tanto que la base C muestra cocientes bajos. En general se observan cocientes mayores asociados con la fuente a 10m, en tanto que no se aprecia relación entre los cocientes y la frecuencia. En todos los casos los resultados son inferiores a la unidad, lo que indica que todas las bases filtran la aceleración máxima.

Base	Coefficiente de correlación entre espectros de Fourier	Coefficiente de correlación entre espectros de respuesta	Cociente de la intensidad de Arias.
Base A	0.84	0.77	0.65
Base B	0.98	0.86	1.00
Base C	0.83	0.67	0.21

Tabla 5.- Resultados obtenidos con vibración ambiental.

Evento	Coefficiente de correlación entre espectros de Fourier	Coefficiente de correlación entre espectros de respuesta	Cociente de la intensidad de Arias	Cociente de aceleración máxima
Base A a 10m frecuencia alta	0.263	0.969	1.170	0.487
Base A a 10m frecuencia baja	0.581	0.943	1.400	0.690
Base A a 5m frecuencia alta	0.623	0.945	0.580	0.440
Base A a 5m frecuencia baja	0.853	0.990	1.160	0.340
Base B a 10m frecuencia alta	0.797	0.975	1.190	0.590
Base B a 10m frecuencia baja	0.851	0.958	1.330	0.760
Base B a 5m frecuencia alta	0.801	0.993	1.880	0.590
Base B a 5m frecuencia baja	0.876	0.990	1.640	0.580
Base C a 10m frecuencia alta	0.222	0.971	0.530	0.270
Base C a 10m frecuencia baja	0.249	0.975	0.640	0.480
Base C a 5m frecuencia alta	0.632	0.976	1.040	0.120
Base C a 5m frecuencia baja	0.571	0.967	1.070	0.100

Tabla 6.- Resultados obtenidos con vibración forzada (Canal transversal)

Evento	Coefficiente de correlación entre espectros de Fourier	Coefficiente de correlación entre espectros de respuesta	Cociente de la intensidad de Arias	Cociente de aceleración máxima
Base A a 10m frecuencia alta	0.383	0.980	0.710	0.810
Base A a 10m frecuencia baja	0.525	0.968	0.730	0.570
Base A a 5m frecuencia alta	0.446	0.987	1.150	0.435
Base A a 5m frecuencia baja	0.905	0.994	0.660	0.540
Base B a 10m frecuencia alta	0.273	0.979	0.820	0.625
Base B a 10m frecuencia baja	0.540	0.980	0.980	0.608
Base B a 5m frecuencia alta	0.908	0.996	1.350	0.355
Base B a 5m frecuencia baja	0.936	0.994	1.36	0.350
Base C a 10m frecuencia alta	0.491	0.978	0.860	0.600
Base C a 10m frecuencia baja	0.400	0.985	0.730	0.360
Base C a 5m frecuencia alta	0.893	0.982	1.290	0.210
Base C a 5m frecuencia baja	0.856	0.969	1.200	0.209

Tabla 7.- Resultados obtenidos con vibración forzada (Canal vertical)

5.5.- Función de transferencia.

Se calcularon las funciones de transferencia, FT, para el intervalo de 1 a 10 Hz, definidas como el cociente de los espectros de Fourier obtenidos para cada base entre los correspondientes al terreno. El cociente se aplicó a los espectros que resultaron de promediar los 12 registros que componen un evento, tanto para las bases como para el terreno.

5.5.1.- Vibración ambiental.

En la figura 29 se presenta la FT obtenida con vibración ambiental en el sentido transversal, en la que se observa que las menores alteraciones las presenta la base B, con amplificaciones máximas de 1.6, deamplificaciones máximas de 0.5 y una tendencia general que oscila alrededor de 1. Las bases A y C muestran en general cocientes inferiores a 1, cuyos valores mínimos alcanzan 0.1 en los extremos del intervalo de frecuencias en estudio; los cocientes se incrementan para las bases A y C en el intervalo central de frecuencias (2-3.5 Hz).

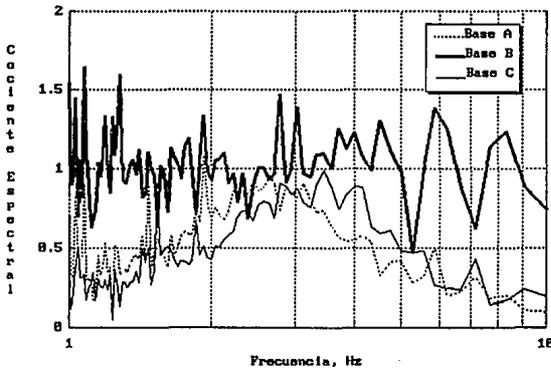


Figura 29.- Funciones de transferencia obtenidas con vibración ambiental.
(Sentido transversal)

5.5.2.- Vibración forzada.

Para el canal transversal, en las figuras 30, 31, 32 y 33 se muestran la FT obtenidas con vibración forzada. Puede observarse que en general la base B muestra el mejor comportamiento, con amplificaciones en general inferiores a 1.9, deamplificaciones no mayores que 0.5 y un comportamiento estable alrededor de 1.

En términos generales se observan en la base A amplificaciones máximas en la FT de 1.95 y deamplificaciones no mayores a 0.4, con un comportamiento estable para la mayor parte del intervalo, salvo en las frecuencias altas, donde tienden ligeramente a incrementarse las distorsiones. Para las bases A y B, con la fuente a 5m, se tiene una respuesta ligeramente amortiguada respecto de la respuesta con la fuente a 10m. La base C manifiesta un comportamiento diferente respecto de la A y B, con deamplificaciones más grandes para las cuatro variantes estudiadas, y que son del orden de 0.3 a 0.4 en promedio.

Para el canal vertical, en las figuras 34, 35, 36 y 37 se muestran las FT obtenidas, de las que puede notarse que el mejor comportamiento lo presenta la base B, con amplificaciones máximas de 1.7, deamplificaciones máximas de 0.5 y una tendencia general que oscila alrededor de 1. Las mayores distorsiones observadas para la base B se observan ante la frecuencia baja, principalmente al final del intervalo de estudio. Puede notarse la influencia de la posición de la fuente, ya que los cocientes espectrales son en general menores cuando la distancia es de 5m. La base A muestra en la FT cocientes ligeramente más distorsionados respecto de la base B, presentándose amplificaciones máximas cercanas a 2, deamplificaciones máximas del orden de 0.15 . El efecto de la frecuencia alta de excitación provoca que las FT muestren los mayores cocientes espectrales, en tanto que con la distancia a la fuente igual a 5m la FT muestra una clara deamplificación.

La base C presenta un comportamiento menos satisfactorio, ya que manifiesta amplificaciones de hasta 1.7, deamplificaciones máximas de 0.3 y una tendencia general amortiguada que hace que la FT oscile generalmente por debajo de 1. La frecuencia alta de vibración provoca los cocientes mayores, en tanto que con la frecuencia baja se tienen los valores de la FT menores. En relación con la distancia a la fuente, la respuesta de las bases cuando la fuente se ubicó a 5m es más atenuada en general respecto de la obtenida a 10m.

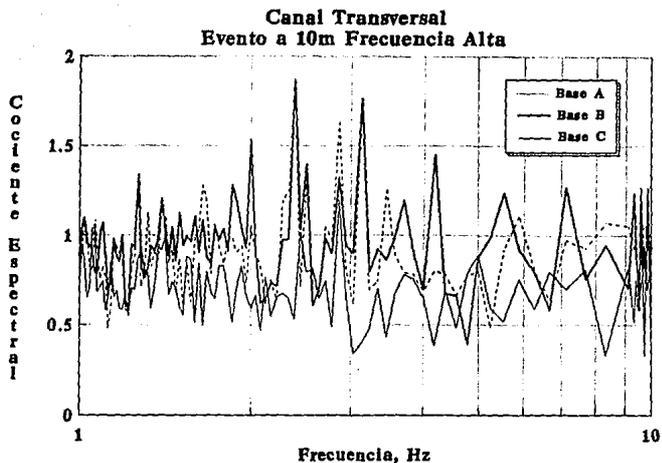


Figura 30.-Funciones de transferencia obtenidas con vibración forzada

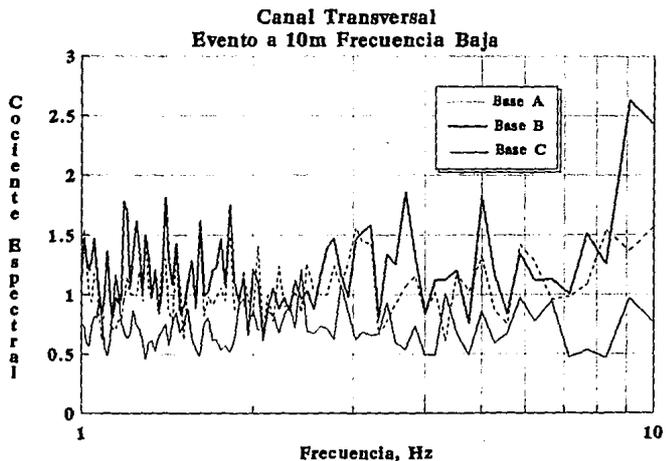


Figura 31.-Funciones de transferencia obtenidas con vibración forzada

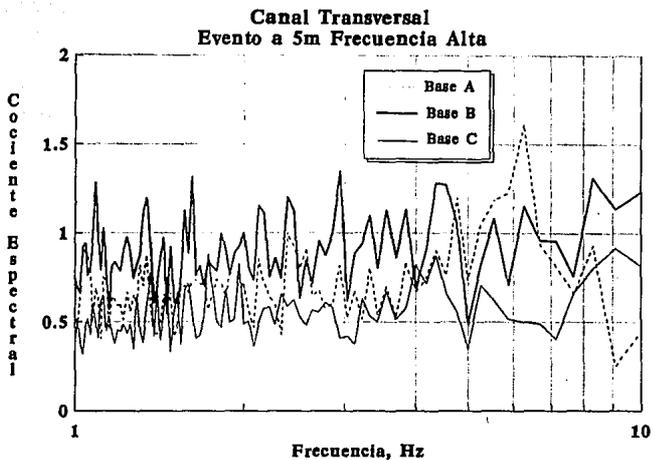


Figura 32.-Funciones de transferencia obtenidas con vibración forzada.

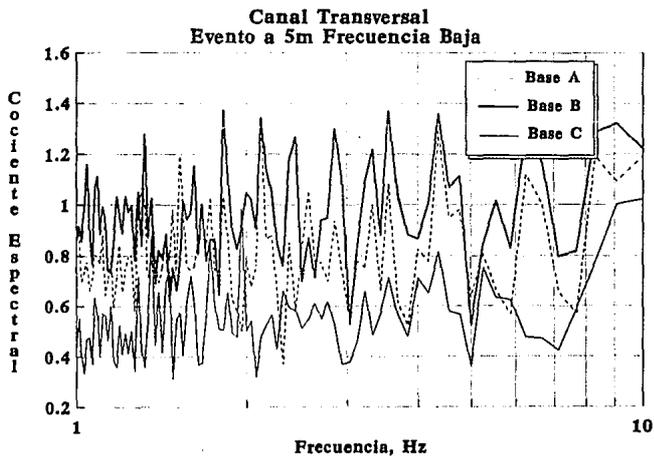


Figura 33.-Funciones de transferencia obtenidas con vibración forzada.

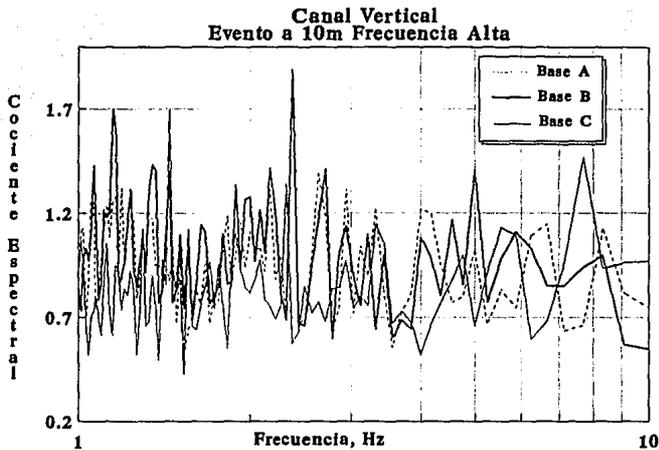


Figura 34.-Funciones de transferencia obtenidas con vibración forzada.

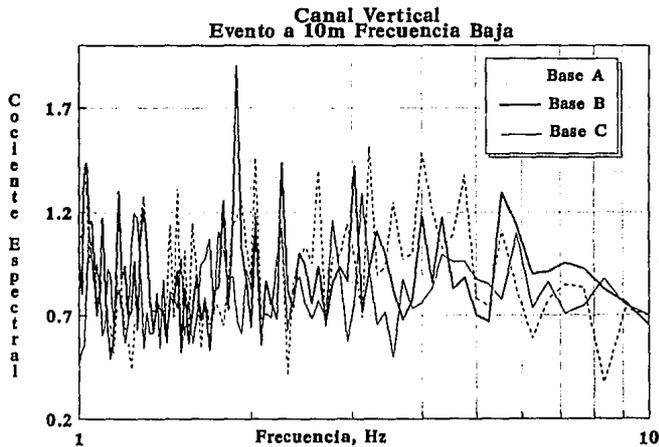


Figura 35.-Funciones de transferencia obtenidas con vibración forzada.

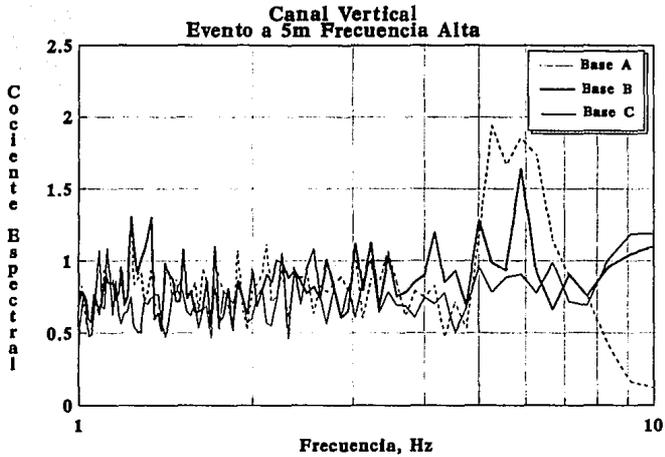


Figura 36.-Funciones de transferencia obtenidas con vibración forzada.

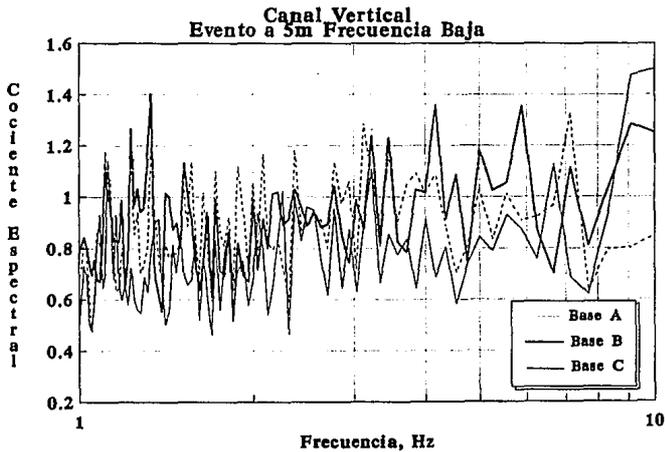


Figura 37.-Funciones de transferencia obtenidas con vibración forzada.

5.6.- Función de coherencia.

La función de coherencia $\gamma_{(xy)}^2$ entre dos señales $x(t)$ y $y(t)$ se define como:

$$\gamma_{(xy)}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f) G_{yy}(f)}$$

donde, para todo el intervalo de frecuencias f , la función de coherencia cumple que:

$$0 \leq \gamma_{(xy)}^2 \leq 1$$

y:

$G_{(xy)}(f)$ = Función de densidad espectral cruzada

$G_{(xx)}(f), G_{(yy)}(f)$ = Espectros de potencia para las series $x(t), y(t)$, respectivamente.

La función de coherencia indica el grado con el que la serie $y(t)$ puede ser estimada a partir de $x(t)$ por medio de una regresión lineal, en función de la frecuencia.

Las funciones de coherencia mostradas son el promedio de las 12 funciones obtenidas por cada evento. Se utilizó para ello el programa de análisis de señales MAC\NAN (USS, 1990). El estudio se realizó en el intervalo de 1 a 10 Hz.

5.6.1.-Vibración ambiental.

De las curvas obtenidas con vibración ambiental (figura 38) se observa que las bases A y B tienen altos valores de coherencia (0.8 - 1.0) en el intervalo que va de 1.2 a 8 Hz,

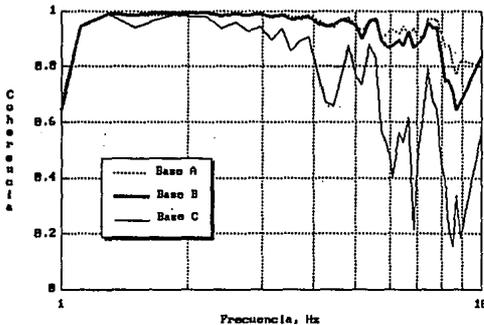


Figura 38.- Funciones de coherencia obtenidas con vibración ambiental

valor a partir del cual la función decae significativamente. El comportamiento de la base C es poco satisfactorio para las frecuencias superiores a 5 Hz, valor por encima del cual la función de coherencia decrece fuertemente.

5.6.2.- Vibración forzada.

Para el canal transversal en vibración forzada (figuras 39, 40, 41 y 42), el comportamiento entre las bases A y B es semejante en el caso del evento a 10m, con valores de coherencia que oscilan entre 0.9 y 0.4 para el intervalo que va de 1 a 5 Hz, en tanto que para el caso del evento a 5m, la base A muestra un comportamiento mejor. El comportamiento es en general satisfactorio para las frecuencias dominantes de la excitación forzada, con valores de coherencia que se mantienen altas o bien se incrementan significativamente en 5.7 Hz para frecuencia baja y en 8.9 Hz para frecuencia alta. La excepción la constituye el evento a 10m con frecuencia alta donde no aparece tal efecto. La base C muestra para casi todos los casos un comportamiento inferior, con alteraciones superiores a las mostradas por las otras bases.

Para el canal vertical, en las figuras 43, 44, 45 y 46 puede apreciarse un comportamiento semejante entre las tres bases para el caso del evento a 5m, en tanto que para el evento a 10m pueden distinguirse comportamientos diferentes. En este último caso, las bases A y B muestran un buen comportamiento en el intervalo de 1.0 a 5.5 Hz, en tanto que la base tipo C muestra valores inferiores para todo el intervalo. Para el caso del evento a 5m, las tres bases presentan un comportamiento satisfactorio entre 1 y 4 Hz, así como para las zonas de 5.7 y 8.9 Hz para los casos de frecuencia baja y alta respectivamente.

En general puede observarse que el comportamiento de la función de coherencia decae desde 1.0 Hz hasta la frecuencia baja de excitación, es decir 5.7 Hz, valor a partir del cual la función decrece fuertemente, tendencia que se mantiene hasta alcanzar el valor de la frecuencia alta de vibración, 8.9 Hz, donde las ordenadas espectrales se incrementan notablemente

Canal Transversal
Evento a 10m Frecuencia Alta

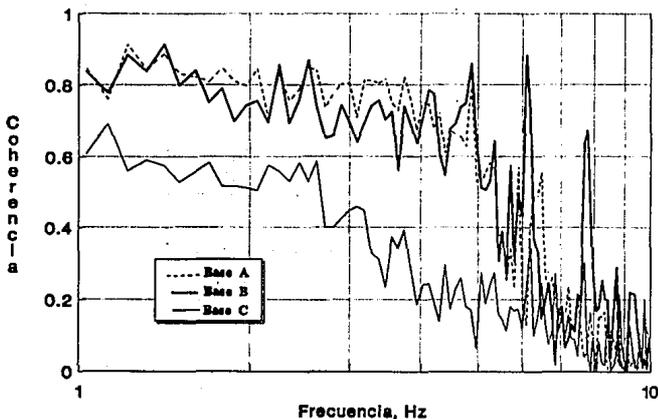


Figura 39.- Funciones de Coherencia obtenidas con vibración forzada.

Canal Transversal
Evento a 10m Frecuencia Baja

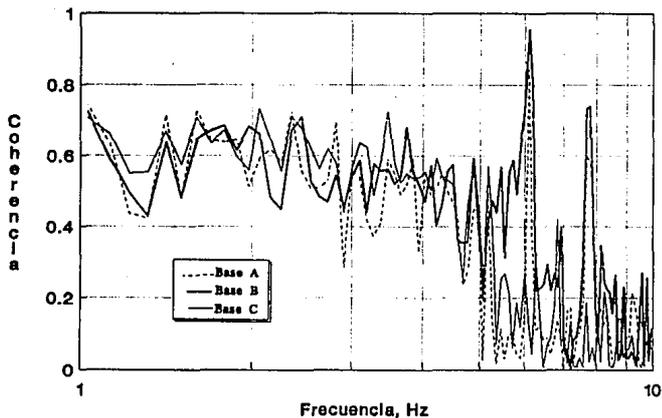


Figura 40.- Funciones de Coherencia obtenidas con vibración forzada.

Canal Transversal
Evento a 5m Frecuencia Alta

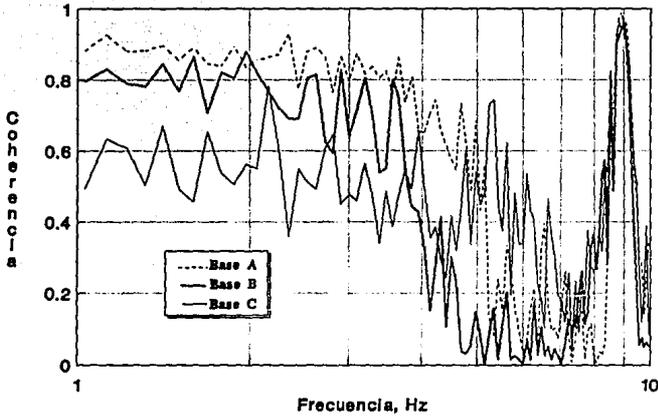


Figura 41.- Funciones de Coherencia obtenidas con vibración forzada.

Canal Transversal
Evento a 5m Frecuencia Baja

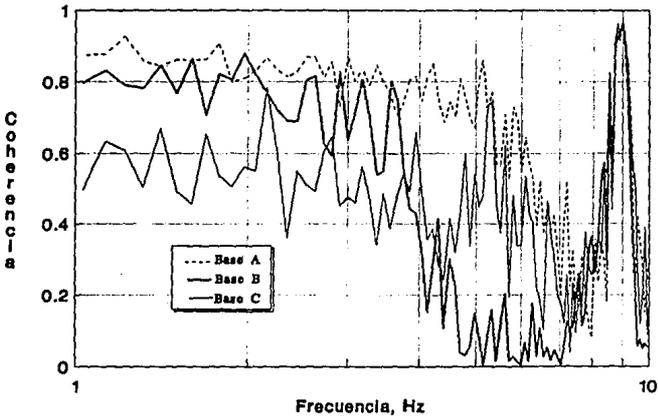


Figura 42.-Funciones de Coherencia obtenidas con vibración forzada.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

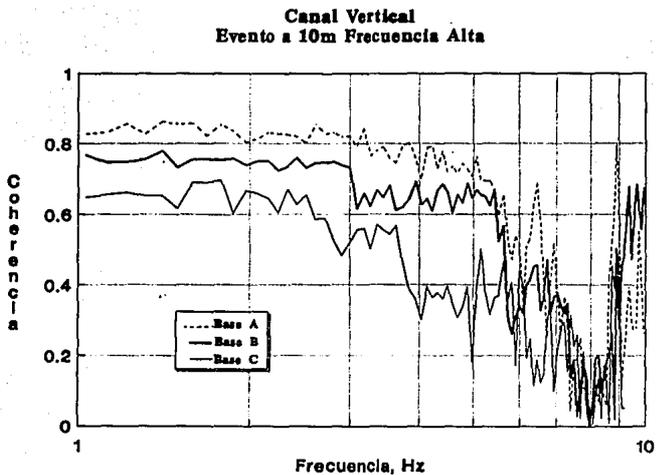


Figura 43.- Funciones de Coherencia obtenidas con vibración forzada.

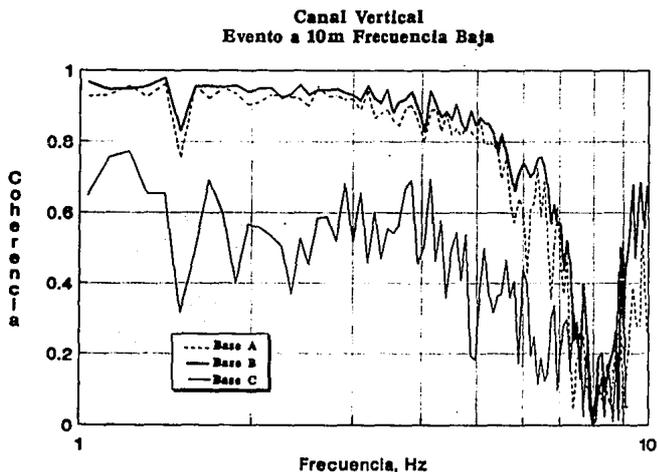


Figura 44.- Funciones de Coherencia obtenidas con vibración forzada.

Canal Vertical
Evento a 5m Frecuencia Alta

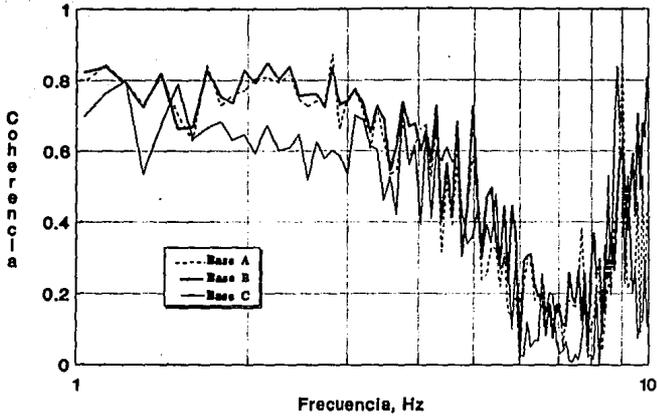


Figura 45.- Funciones de Coherencia obtenidas con vibración forzada.

Canal Vertical
Evento a 5m Frecuencia Baja

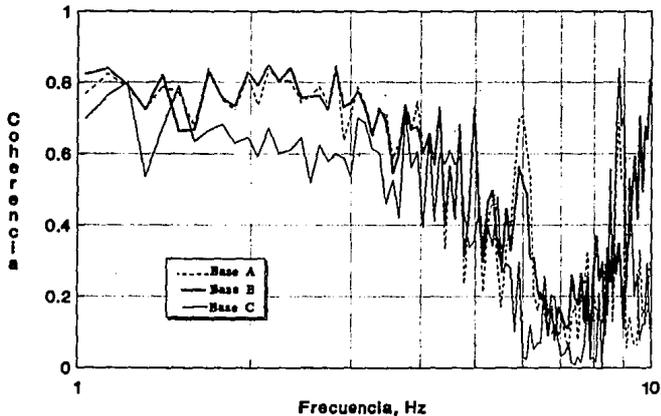


Figura 46.- Funciones de Coherencia obtenidas con vibración forzada.

6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede establecer que en los tres tipos de bases existen efectos de interacción suelo estructura, cuyo grado depende de la geometría de la base, el tipo de excitación y de los parámetros de comparación considerados. Los efectos de interacción se presentan aún cuando la longitud de las ondas de cortante es mucho mayor que las dimensiones de las bases, por lo que es posible que no influya el contraste entre la rigidez de la base y la del suelo.

En general los EISE se manifiestan en las amplificaciones y deamplificaciones observadas en las funciones de transferencia, y corroborados por las funciones de coherencia. Los coeficientes de correlación entre espectros de Fourier y de respuesta, los cocientes de intensidad de Arias y los cocientes de aceleración máxima permitieron identificar el grado de importancia de estos efectos. Pudo también determinarse que las distorsiones encontradas entre los espectros de Fourier en general no son graves para las bases A y B y que los espectros de respuesta obtenidos en todos los casos prácticamente no se ven alterados. Los parámetros en los que se observan las mayores discrepancias son los cocientes de la intensidad de Arias y los cocientes de la aceleración máxima, la que es filtrada por todas las bases, especialmente en la base C, en la cual se observan los mayores efectos deamplificadores.

El tipo de vibración, ambiental o forzada, modifica el grado de los efectos de interacción observados de acuerdo con el parámetro de comparación: La correlación entre espectros de Fourier es en general mejor ante vibración ambiental, en tanto que la correlación entre espectros de respuesta es más alta con vibración forzada. Lo mismo ocurre con los cocientes de la intensidad de Arias. El comportamiento de las bases en función de la frecuencia y la distancia de excitación es mejor en general para la frecuencia alta y con la distancia a la fuente de 5m.

La respuesta de las bases A y B en el intervalo de frecuencias donde se ubican las estructuras comunes y la frecuencia natural del terreno (1 - 3 Hz) es satisfactorio de acuerdo con los resultados. En términos generales la base B es la que muestra un comportamiento mejor, debido a su menor peso y a que es la que impone las menores alteraciones al terreno. Le sigue la base A, cuyas diferencias de comportamiento respecto de la base B no son importantes, por lo que considerando que sus características de peso y geometría proporcionan las mejores condiciones de seguridad, se eligió este tipo para las bases de las estaciones de la Red de Instrumentación Sísmica de la UAM. La base C muestra los mayores efectos de interacción, en general atenuadores de la respuesta, asociados al efecto del hueco y a que es el tipo de base que altera en mayor grado las condiciones originales de rigidez del terreno.

Los EISE encontrados en la base A se describen a continuación:

- a) Los espectros de Fourier se correlacionaron bien en vibración ambiental ($r_{xy}=0.84$), pero la correlación disminuye en vibración forzada ($0.26 \leq r_{xy} \leq 0.85$).
- b) Los espectros de respuesta presentan una correlación muy alta en vibración forzada ($0.94 \leq r_{xy} \leq 0.99$), en tanto que para vibración ambiental disminuye sensiblemente ($r_{xy}=0.77$).
- c) El cociente de la intensidad de Arias indica que la energía contenida en el acelerograma por unidad de peso medida sobre la base con vibración ambiental es menor que la del terreno (0.65), en tanto que con vibración forzada es variable ya que el cociente oscila entre 0.58 y 1.40.
- d) Las aceleraciones máximas registradas sobre la base son siempre menores a las del terreno, y sus cocientes van de 0.20 a 0.65.

e) La función de transferencia obtenida en vibración ambiental indica un efecto atenuante en todo el intervalo de frecuencias en estudio. Los cocientes espectrales (CE) mínimos ($0.2 \leq CE \leq 0.7$) se presentan en el intervalo de 1 a 2 Hz y de 3.5 a 10 Hz. En el intervalo que va de 2 a 3.5 Hz la función de transferencia alcanza su máximo ($0.7 \leq CE \leq 1.10$). La tendencia de la función de transferencia cambia en vibración forzada, dado que no existe un efecto atenuador dominante. Los efectos distorsionantes aumentan con la frecuencia, pero sin sobrepasar en términos generales un factor de 2 ($0.4 \leq CE \leq 1.95$).

f) La coherencia entre la señal registrada sobre la base y el terreno con vibración ambiental es muy alta (0.8 a 1.0) en la mayor parte del intervalo (1.2 a 8 Hz) y decrece lentamente con la frecuencia. Con vibración forzada, para la mayoría de los casos en los canales vertical y transversal, la función de coherencia es satisfactoria (0.7 a 0.9) en el intervalo de 1 a 5 Hz, así como para las frecuencias dominantes de la excitación (5.7 y 8.9 Hz).

Los EISE encontrados en la base B se describen a continuación:

a) La correlación entre los espectros de Fourier con vibración ambiental es muy alta ($r_{xy} = 0.98$), en tanto que para vibración forzada disminuye ($0.25 \leq r_{xy} \leq 0.90$).

b) La correlación entre los espectros de respuesta con vibración ambiental es la más alta (0.86). Lo mismo sucede con vibración forzada, ($0.98 \leq r_{xy} \leq 0.99$).

c) El cociente de la intensidad de Arias obtenido con vibración ambiental para esta base fue de 1. Con vibración forzada los cocientes varían, aunque en la mayoría de los casos son superiores a 1. Los cocientes de la intensidad de Arias en este caso oscilan desde 0.82 a 1.88.

d) Los cocientes de aceleración máxima son en todos los casos inferiores a 1.0 y sus valores oscilan entre 0.35 y 0.76.

e) La función de transferencia en vibración ambiental muestra cocientes espectrales que van de 0.5 a 1.60; Los cocientes mayores se presentan en las frecuencias bajas, en tanto que los menores se ubican arriba de 5.0 Hz.

En vibración forzada las funciones de transferencia muestran una ligera tendencia a deamplificar la respuesta cuando la fuente está a 5m. Para este último caso las máximas amplificaciones no sobrepasan en general un cociente espectral de 1.4 en tanto que las máximas atenuaciones representan un cociente espectral de 0.5. Cuando la fuente se ubica a 10m, el promedio espectral se aproxima a 1, con cocientes espectrales que oscilan entre $0.5 \leq CE \leq 1.8$. Se observa la tendencia a amplificar la respuesta cuando aumenta la frecuencia para el evento de frecuencia baja, canal transversal.

f) La función de coherencia en vibración ambiental muestra coeficientes muy altos (0.9 a 1.0) en el intervalo que va de 1.5 a 6.0 Hz, más allá del cual la coherencia decrece lentamente con la frecuencia. En vibración forzada las funciones de coherencia muestran en general coeficientes satisfactorios (0.6 a 0.9) en el intervalo de 1 a 4 Hz.

Los EISE en la base C se describen a continuación:

a) El coeficiente de correlación entre espectros de Fourier ante vibración ambiental es inferior al presentado por las otras bases ($r_{xy} = 0.83$), en tanto que con vibración forzada los coeficientes varían ampliamente ($0.22 \leq r_{xy} \leq 0.89$).

b) La correlación entre los espectros de respuesta indica diferencias significativas en el caso de vibración ambiental ($r_{xy} = 0.67$), sin embargo la situación mejora sensiblemente cuando la vibración es forzada ($0.97 \leq r_{xy} \leq 0.99$).

c) El cociente de la intensidad de Arias resultó el más bajo para las bases (0.21) en vibración ambiental, en tanto que para vibración forzada los cocientes se ubican entre 0.53 y 1.30, coincidiendo con la fuente a 5m los cocientes más altos.

d) En todos los casos la aceleración máxima registrada sobre la base es menor que la del terreno y el cociente varía de 0.10 a 0.60.

e) La función de transferencia obtenida en vibración ambiental indica la atenuación de la respuesta en todo el intervalo en estudio. En la zona comprendida entre 2.5 y 4.5 Hz la función alcanza los máximos cocientes ($0.7 \leq CE \leq 0.99$), mientras que fuera de ese intervalo, la función decrece ($0.1 \leq CE \leq 0.7$). En vibración forzada para todos los casos las funciones de transferencia muestran un efecto predominantemente deamplificador ya que el promedio espectral es menor que 1. Los cocientes espectrales oscilan entre 0.35 a 1.40.

f) La función de coherencia en vibración ambiental para la base C muestra valores muy altos (0.9 a 1.0) en el intervalo que va de 1.5 a 4 Hz. De 4 Hz en adelante la función decae rápidamente hasta coherencias menores a 0.2 para frecuencias altas. En el caso de vibración forzada la base C presenta en general valores de coherencia baja principalmente en el intervalo que va de 3 a 10 Hz, excepto en algunos casos para las frecuencias de excitación de 5.7 y 8.9 Hz.

Es de interés comparar los resultados obtenidos de los estudios efectuados usando vibración ambiental en las estaciones Viveros, en la ciudad de México (Chávez^(b), et.al., 1989) y en las estaciones ACAC y ACAD en Acapulco, Gro., (Alcántara et.al., 1991) todas ellas localizadas en terrenos clasificados como de transición. En el caso de la estación Viveros pudieron observarse amplificaciones en las funciones de transferencia obtenidas para los canales horizontales del orden de 2.0 para el intervalo que va de 5.0 a 10 Hz., en tanto que para el canal vertical la máxima amplificación se localiza en 2.0 Hz con un cociente espectral de 3.1. La deamplificación máxima observada es de 0.4

en 2.0 Hz.

En la estación ACAC se observa una amplificación máxima de 1.8 en 3.5 Hz y mínima de 0.3 en 1.2 Hz, con una tendencia decreciente hacia los extremos del intervalo. Finalmente, la estación ACAD presenta amplificaciones importantes, del orden de 5 en 1.0 Hz y deamplificaciones máximas de 0.35 en 2.0 Hz, con una clara tendencia a la amplificación al disminuir la frecuencia.

Es interesante observar que, con excepción de la estación ACAD, las estaciones Viveros, ACAC así como las bases correspondientes a este estudio coinciden al mostrar amplificaciones no mayores a 2.0, ni deamplificaciones mayores que 0.1 para el intervalo que va de 1.0 a 10 Hz. Sin embargo es posible observar diferencias importantes en cuanto a la tendencia que presentan las funciones de transferencia en relación con la frecuencia, que pueden atribuirse tanto a las diferencias en la estratigrafía local de cada sitio, como a la diferencia de geometría, peso, nivel de desplante y tipo de caseta de las bases estudiadas.

Como consecuencia de este estudio se recomienda continuar con estudios experimentales y teóricos (Chávez^{b)}, 1989, 1991) sobre estaciones acelerográficas ubicadas en otras zonas geotécnicas de la ciudad con el objeto de determinar las condiciones de geometría, nivel de desplante, peso y cimentación más adecuadas al tipo de terreno, tarea a la cual contribuirá la UAM en una etapa posterior de este estudio para los casos de las unidades Xochimilco e Iztapalapa. Se recomienda asimismo efectuar estudios experimentales en estaciones acelerográficas ante movimientos sísmicos, debido a que en este trabajo pudo concluirse que el tipo de vibración afecta significativamente el comportamiento de las estaciones acelerográficas. Finalmente, es de gran interés efectuar estudios que determinen los posibles EISE en las estaciones acelerográficas ya existentes en el país, con el objeto de conocer el grado de confiabilidad de los registros provenientes de esas estaciones.

REFERENCIAS

Alcántara, L. *et.al.*, 1991, "Efectos de ISE en estaciones acelerográficas ubicadas en terreno duro". IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VIII de Ingeniería Estructural, Manzanillo, Col., 2-78 a 2-88

Arias, A. 1969. "A measure of earthquake intensity". Seismic Design for Nuclear Power Plants. R. Hansen editor, MIT Press, Cambridge Mass.

Bycroft, G. 1978, "The effect of soil-structure interaction on seismometer readings", Bulletin of Seismological Society of America, vol. 68.

Bendat, J. and Piersol, A. 1986, "Random Data. Analysis and Measurement Procedures" 2nd edition. Wiley Interscience. New York, N.Y.

Chávez, M^(a). *et.al.*, 1989, "Estudio teórico-experimental de los efectos de interacción suelo-estructura en la estación acelerográfica SCT que registró el sismo de septiembre de 1985". VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro. A-226 a A-236.

Chávez, M^(b). *et.al.*, 1989, "An Experimental Study About the Soil-Structure Interaction Effects at Three Mexico City Accelerograph Stations which recorded the 1985 Mexico Earthquake". Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, México City, October 1989.

Crouse, C. *et.al.*, 1984, "Experimental study of soil-structure interaction at an accelerograph station". Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 74, No.5, p.1995-2013.

DDF (Departamento del Distrito Federal) 1987. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Diario Oficial de la Federación.

Geosol 1992, "Estudio de mecánica de suelos para el proyecto de la cimentación del edificio para la Coordinación de Sistemas Escolares y Cómputo, de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco". México D.F.

Gómez, A. *et.al.* 1992, "Intensidades y demandas de ductilidad de sismos recientes en la ciudad de México". Departamento de Materiales. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. México.

Kinematics Inc. 1989, "Seismic Workstation Software". Pasadena, California.

Lermo, J. *et.al.* "The Mexico earthquake of september 19,1985-Natural period of sites in the Valley of Mexico from microtremor measurements and strong motion data" Earthquake Spectra. Vol 4 No.4, 805-815.

Otero, J. 1991, "Estaciones acelerográficas de la Fundación ICA en la ciudad de México". Simposio sobre instrumentación sísmica de temblores fuertes. CENAPRED. p.55-59.

Quaas, R. *et.al.* 1991, "Red de observación sísmica del Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED". Simposio sobre instrumentación sísmica de temblores fuertes. p.41-49.

USS (University Software Systems) 1990, "Micro MAC/RAN Software. Time Series & Spectral Analysis System". Los Angeles, California.

LISTA DE FIGURAS

1.- Caseta rectangular de mampostería y concreto reforzado	5
2.- Caseta rectangular de concreto reforzado totalmente enterrada	6
3.- Estación cilíndrica de concreto reforzado parcialmente enterrada	7
4.- Estación rectangular a base de concreto armado	8
5.- Caseta metálica anclada en un cajón hueco de concreto reforzado	9
6.- Caseta metálica alta y base de concreto armado	10
7.- Caseta metálica baja y base de concreto reforzado	11
8.- Base tipo "A"	13
9.- Base tipo "B"	14
10.- Base tipo "C"	15
11.- Ubicación del sitio de pruebas	16
12.- Ubicación de las bases dentro de la Unidad Azcapotzalco	17
13.- Ubicación relativa de las bases	18
14.- Estratigrafía del suelo en la zona de pruebas	20
15.- Arreglo de los sensores sobre las bases en experimento de vibración ambiental	24
16.- Vista del arreglo de los sensores para vibración ambiental	24
17.- Muestra de la señal en el dominio del tiempo del experimento ante vibración ambiental	26
18.- Arreglo de acelerógrafos para el experimento ante vibración forzada	29
19.- Vista del arreglo de los acelerógrafos para el experimento ante vibración forzada	30
20.- Espectro de Fourier para el caso de vibración forzada alta	31
21.- Espectro de Fourier para el caso de vibración forzada baja	31
22.- Ubicación de la fuente de vibración forzada	33
23.- Muestra de la señal en el dominio del tiempo del experimento ante vibración forzada	35

24.- Espectro de Fourier de un registro de vibración ambiental sobre la base A	38
25.- Espectro de Fourier de un registro de vibración ambiental sobre la base B	38
26.- Espectro de Fourier de un registro de vibración ambiental sobre la base C	38
27.- Espectro de Fourier de un registro de vibración ambiental sobre el suelo	38
28.- Función de transferencia entre una señal filtrada y la no filtrada	39
29.- Funciones de transferencia obtenidas con vibración ambiental	49
30-37.- Funciones de transferencia obtenidas con vibración forzada	51-54
38.- Funciones de coherencia obtenidas con vibración ambiental	56
39-46.- Funciones de coherencia obtenidas con vibración forzada	58-61