

01163  
2ej.

ESTUDIOS SOBRE LOS EFECTOS DE INTERACCION  
SUELO-ESTRUCTURA EN LAS ESTACIONES DE REGISTRO  
DE ACELERACIONES DEL D.F. QUE REGISTRARON  
LOS SISMOS DE 1985

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  
(MECANICA DE SUELOS)

LEONARDO ALCANTARA NOLASCO

CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F., junio, 1989

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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.

## RESUMEN

Se realiza un estudio analítico-experimental en las estaciones de registro de aceleración: Central de Abasto Oficina (CDAO), Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Tlahuac Bombas (TLHB) y Tlahuac Deportivo (TLHD) ubicadas en la zona de suelos compresibles del valle de México. La finalidad es estudiar el fenómeno de interacción suelo-estructura en tales estaciones ante la ocurrencia de un evento sísmico.

Para este efecto se diseñó un experimento que utiliza la técnica de microtemblores, la cual se basa en el registro de ruido ambiental; de esta manera se obtuvieron registros simultáneos en la base de la estación y en puntos previamente seleccionados y ubicados a una cierta distancia de esta. Con la información obtenida se determinaron las funciones de transferencia experimentales (FT).

El estudio analítico se realizó únicamente en la estación SCT y se basó en la utilización de un modelo teórico que consiste de una base rígida embebida en un semiespacio elástico y con dos grados de libertad, uno de desplazamiento horizontal y otro de giro.

De la parte experimental se concluye que existen efectos de interacción suelo-estructura en las 4 estaciones acelerográficas incluidas en el estudio, para la banda de frecuencias considerada (0.3 a 20 Hz). Respecto a las componentes horizontales, en SCT se tienen amplificaciones de hasta 12 veces para 20 Hz, en TLHB y TLHD de 8 y 3 veces para 5 Hz respectivamente. Además en TLHD existen deamplificaciones de 0.15 veces a 20 Hz. En la estación CDAO solo se observa deamplificación de 0.2 veces a 6 Hz. Las componentes verticales, en todas las estaciones, presentan amplificaciones y deamplificaciones promedio de 1.5 y 0.85 en la banda de frecuencias estudiada.

Los resultados obtenidos utilizando la función de transferencia teórica en la estación SCT no son satisfactorios, por lo que no se recomienda su uso para sitios con este tipo de suelo.

**RESUMEN**

<b>1. INTRODUCCION</b> .....	1
1.1 Consideraciones generales	
1.2 Interacción suelo-estructura	
1.3 Objetivo de la tesis	
<b>2. PROPIEDADES DINAMICAS DE LOS SUELOS EN DONDE SE LOCALIZAN LAS ESTACIONES DE REGISTRO DE ACELERACION ANALIZADAS</b> .....	5
2.1 Estaciones de registro de aceleración incluidas en el estudio	
2.2 Propiedades dinámicas de los suelos en donde se localizan las estaciones de interés	
<b>3. CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS DE LAS ESTACIONES DE INTERES</b> .....	26
3.1 Estación de registro de aceleración Central de Abasto Oficina	
3.2 Estación de registro de aceleración Secretaría de Comunicaciones y Transportes	
3.3 Estación de registro de aceleración Tlánuac Bombas	
3.4 Estación de registro de aceleración Tlánuac Deportivo	
<b>4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE LOS EFECTOS DE INTERACCION SUELO ESTRUCTURA EN LAS ESTACIONES DE INTERES</b> .....	37
4.1 Descripción de la técnica de microtemblores	
4.2 Aplicación de la técnica de microtemblores para estudiar los efectos de interacción suelo-estructura en las estaciones de registro de aceleraciones	
4.3 Diseño del experimento en las estaciones de registro de aceleración	
4.4 Procesamiento de la información	
<b>5. ESTUDIO TEORICO SOBRE LOS EFECTOS DE INTERACCION SUELO ESTRUCTURA EN LA ESTACION DE REGISTRO DE ACELERACION SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES</b> .....	74
5.1 Modelo de interacción suelo-estructura	
5.2 Funciones de impedancia	
5.3 Función de transferencia teórica para la estación	

<b>6. ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEORICOS DE LOS EFECTOS DE INTERACCION SUELO ESTRUCTURA EN LAS ESTACIONES DE INTERES .....</b>	<b>92</b>
6.1 Analisis de los resultados experimentales de la estacion Central de Abasto Oficina	
6.2 Analisis de los resultados experimentales de la estacion Secretaria de Comunicaciones y Transportes.	
6.3 Analisis de los resultados experimentales de la estacion Tlánuac Bombas	
6.4 Analisis de los resultados experimentales de la estacion Tlánuac Deportivo	
6.5 Comparación de las funciones de transferencia experimentales de las estaciones de interés	
6.6 Comparación de las funciones de transferencia teórica y experimental de la estacion Secretaria de Comunicaciones y Transportes	
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>126</b>
<b>APENDICE A. PRUEBAS DE LABORATORIO Y DE CAMPO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DINAMICAS DE LOS SUELOS .....</b>	<b>127</b>
<b>REFERENCIAS</b>	

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 Consideraciones Generales

Existen diversas causas que originan la ocurrencia de un temblor, entre ellas se pueden mencionar: el desplazamiento relativo de las placas tectónicas y la actividad volcánica. Estas provocan la emanación de ondas sísmicas en todas direcciones, desde un punto denominado foco. Las principales ondas sísmicas que se generan son de dos tipos: ondas internas (P y S) y ondas superficiales (Love y Rayleigh), (ref. 1).

#### Ondas internas

Como su nombre lo indica este tipo de ondas se propaga en el interior de las capas terrestres y son conocidas como: ondas primarias (ondas P) y ondas secundarias (ondas S).

Ondas primarias (P). En este tipo de ondas las partículas se desplazan en la dirección de propagación de la onda, comprimiendo y dilatando alternativamente el medio de propagación (fig 1.a). La velocidad de propagación de las ondas P es la mas rápida, en comparación con la velocidad de propagación de otros tipos, además son capaces de transmitirse en medios sólidos así como en medios líquidos.

Ondas secundarias (S). También conocidas como ondas de cortante, son las ondas internas de velocidad de propagación menor. Estas producen una deformación lateral, en el medio de propagación, que forma un ángulo recto con la dirección en que se propagan (fig 1.b). Este tipo de ondas, a diferencia de las ondas P, solo pueden transmitirse en medios sólidos.

#### Ondas superficiales

La propagación de este tipo de ondas está limitada a la superficie del suelo, por lo que su movimiento se ubica en la superficie libre del medio y conforme la profundidad es mayor los movimientos producidos por estas ondas son menores. Como ondas superficiales podemos citar a dos principalmente: ondas Love y ondas Rayleigh.

Ondas Love. El movimiento de las partículas del medio, para este tipo de ondas, es perpendicular a su dirección de propagación sobre un plano horizontal paralelo a la superficie del medio, además carecen de desplazamiento vertical, (fig 1.c).

En general la velocidad de propagación de las ondas Love es menor que el de las ondas de Rayleigh, pero menor al de las ondas internas.

Ondas Rayleigh. Las partículas del medio, bajo la acción de ondas Rayleigh, se mueven en forma elíptica retrógrada sobre un plano vertical orientado en la dirección de propagación de las ondas (fig 1.d), por lo que en este tipo de ondas existen desplazamientos de las partículas tanto en dirección vertical como horizontal, teniéndose esfuerzos de compresión y de cortante.

### Filtrado local de las ondas sísmicas

En una formación rocosa sobre la cual se encuentran depósitos de material más blandos, al arriivar las ondas sísmicas al primero y propagarse sobre el segundo, sufren un efecto de filtrado local provocando la intensificación de ondas de determinada frecuencia y la reducción de ondas con otro tipo de frecuencias (refs. 2 y 3), estos fenómenos también se conocen como amplificación o deamplificación local respectivamente. Estudios sobre el temblor de septiembre 19 de 1985, realizados para diferentes zonas en el valle de México, han mostrado amplificaciones de los movimientos en la zona del lago de 8 a 50 veces con respecto a los movimientos en la zona de lomas (ref. 4). Tales efectos dependen de factores como: el perfil estratigráfico, las propiedades dinámicas de los estratos y la intensidad del movimiento.

### 1.2 Interacción suelo-estructura

Los movimientos en la base de una estructura, desplantada en suelo blando, son diferentes a los de la roca basal debido a que el suelo filtra las ondas sísmicas y a que la estructura modifica los movimientos, estableciendo así el fenómeno denominado interacción suelo-estructura. En su estudio se reconocen dos tipos: interacción cinemática e interacción inercial (ref. 5).

Interacción cinemática. A este aspecto contribuyen la superficie y rigidez de la cimentación de la estructura puesto que la amplitud de los movimientos varía en razón inversa a los factores anteriores. La profundidad de desplante es otro elemento que influye en este tipo de interacción debido a que con mayor profundidad la amplitud del movimiento varía según el tipo de onda.

Interacción inercial. Debido a este efecto los valores del periodo fundamental ( $T$ ) y el amortiguamiento ( $D$ ) cambian propiciando respuestas diferentes, dependiendo del periodo natural de la estructura.

Efectos como los mencionados pueden presentarse en las estaciones acelerográficas y sismológicas provocando que los registros obtenidos de las señales sísmicas no representen los que se hubiesen registrado en "campo libre" es decir en ausencia de la estación.

Cuantificar la magnitud de la interacción suelo-estructura en los registros de acelerogramas o sismogramas es de vital importancia, puesto que la utilización de estos para investigaciones en ingeniería sísmica o sismología parte de la hipótesis de que las señales son de "campo libre".

### 1.3 Objetivo de la tesis.

Considerando los aspectos discutidos en 1.2, en esta tesis se realizará un estudio analítico-experimental en cuatro estaciones acelerográficas instaladas en el Distrito Federal, con el objetivo de determinar la existencia de efectos de interacción suelo-estructura que estén afectando los registros de acelerogramas obtenidos de estas estaciones.

Las estaciones de registro de aceleración (ERA) para las que se realizará el estudio experimental son: Central de Abasto Oficina (CDAO), Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Tláhuac Bombas (TLHB) y Tláhuac Deportivo (TLHD); además para la estación SCT también se efectuará un estudio teórico del fenómeno de interacción suelo-estructura.

Dado que dichas estaciones se encuentran ubicadas en la zona de suelos compresibles, en el capítulo 2 se presentan las principales propiedades dinámicas de interés en este estudio, para los suelos donde se localizan las ERA. En el capítulo 3 se presenta una descripción de las características constructivas de las ERA. El capítulo 4 trata sobre el estudio experimental realizado en las ERA de interés, para determinar los efectos de interacción suelo-base utilizando la técnica de microtemblores. El estudio analítico de los efectos de interacción suelo-estructura realizado para la estación SCT se presenta en el capítulo 5. El análisis de los resultados tanto del experimento como del estudio analítico se presenta en el capítulo 6. Las conclusiones y recomendaciones del estudio en el capítulo 7.

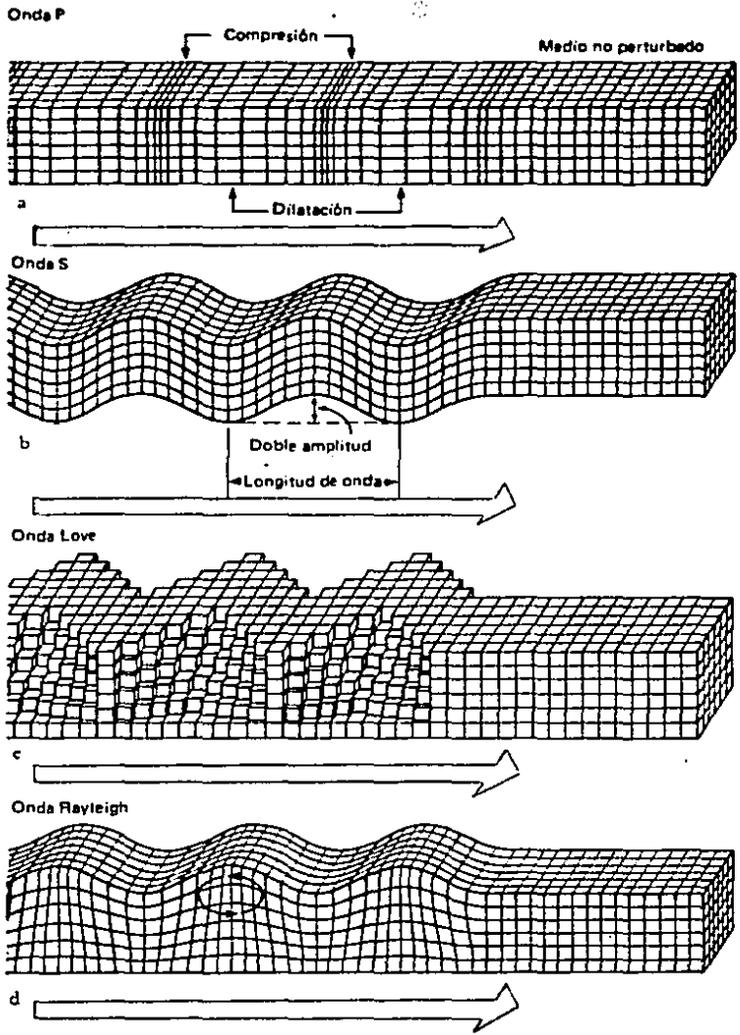


Fig. 1. Principales tipos de ondas sísmicas (ref. 1),  
 a) Onda compresional (P)  
 b) " cortante (S)  
 c) " Love (L)  
 d) " Rayleigh (R)

## 2. PROPIEDADES DINAMICAS DE LOS SUELOS EN DONDE SE LOCALIZAN LAS ESTACIONES DE REGISTRO DE ACELERACION ANALIZADAS.

Las principales propiedades mecánicas que definen el comportamiento de un suelo cuando es sometido a cargas dinámicas son: El módulo de cortante  $G$ , la relación de amortiguamiento  $D$ , las relaciones esfuerzo deformación, la resistencia bajo carga cíclica y la relación de Poisson. Estas son a su vez función del estado y la trayectoria de esfuerzos efectivos así como de la velocidad de deformación (ref.5).

Existen varias pruebas de laboratorio que permiten determinar las propiedades dinámicas anteriores, entre ellas se pueden mencionar las siguientes: triaxial cíclica, columna resonante, torsión cíclica y corte simple cíclico (Apéndice A). En la tabla 2.1 se presenta una síntesis de estas y se hace énfasis en las condiciones de esfuerzo o deformación para las que son aplicables.

También existen procedimientos de campo que permiten estimar otros parámetros del suelo (como lo es la velocidad de propagación de las ondas de cortante) que combinados con expresiones teóricas conducen a las propiedades de interés del suelo en cuestión. Entre dichos procedimientos se pueden mencionar los siguientes: pozos cruzados, down hole, up hole y sonda suspendida (Apéndice A). En la figura 2.1 se presenta en forma esquemática el rango de deformaciones angulares que se cubren con las pruebas de laboratorio y de campo mencionadas, así como las que se presentan durante un temblor.

### 2.1 Estaciones de registro de aceleración incluidas en el estudio.

Como se mencionó en el capítulo 1 las estaciones de registro de aceleración (ERA) en las que se realizaron los experimentos y estudios presentados en esta tesis son: CDAU, ILHB, TLHD y SCI, la ubicación de estas se proporciona en la fig. 2.2.

El valle de México ha sido clasificado en 3 zonas, de acuerdo a la constitución geológica de los suelos que lo conforman: de lago, de transición y de lomas (ref. 6). Recientemente se ha propuesto agregar a la anterior clasificación la zona de los lagos de Xochimilco y Chalco (ref. 7), debido a que esta última presenta propiedades mecánicas diferentes a la de lago. En la figura 2.2 se muestra esta zonificación.

A continuación se presenta una breve caracterización de las 3 zonas.

Zona de lago. Se encuentra constituida por la formación arcillosa superior (intercalación de estratos de arcilla, arena, vidrio volcánico y fósiles), primera capa dura (limo arenoso cementado),

formación arcillosa inferior y depósitos profundos. (fig. 2.2).

Zona de transición. Ubicada entre las zonas de lago y lomas presenta una estratigrafía muy irregular de materiales arcillosos blandos con limos y arenas compactos. (fig. 2.2).

Zona de lomas. Constituida principalmente por suelos areno-limosos compactos, gravas y tobos pumíticas bien cementadas, hacia el sur y en algunas partes del oriente se tienen derrames lávicos de espesor variable. (fig. 2.2).

En forma general se puede decir que las ERA incluidas en este estudio, se encuentran en la zona de lago, pero particularizando y de acuerdo a la ref. 7, la estación SCT1 se localiza en la parte preconsolidada del lago, CDAU en el área virgen y las estaciones en Tláhuac (TLHB y TLHD) en la zona de los lagos de Achimilco-Chalco.

## 2.2 Propiedades dinámicas de los suelos en donde se localizan las estaciones de interés.

Las propiedades dinámicas de mayor interés en éste trabajo son: el módulo de rigidez al cortante ( $G$ ) y la relación de amortiguamiento ( $D$ ). Las cuales son incluidas aquí así como el peso volumétrico para los suelos en que se apoyan las ERA de interés.

La información fue obtenida (ref. 7) de pruebas de laboratorio (triaxial cíclica y columna resonante, apéndice A) y de campo (down-hole, up-hole y sonda suspendida, apéndice A). En las tablas 2.2 y 2.3 se muestran los resultados obtenidos en pruebas de columna resonante y triaxial cíclica respectivamente, en muestras extraídas mediante sondeos localizados en la vecindad de los sitios donde se encuentran ubicadas las ERA. Se proporcionan los valores de  $G$  y  $D$  para distintas presiones de confinamiento.

En lo que sigue se hace una breve discusión de los valores de  $G$  y  $D$  mostrados en las tablas 2.2 y 2.3:

### a) Módulo de rigidez al cortante, $G$ .

#### Columna resonante (Tabla 2.2)

El valor de  $G$  varía en proporción directa con la presión confinante aplicada. Como se muestra en la tabla 2.2 se utilizan dos valores de presión confinante, siendo el segundo valor del doble respecto al primer valor de ensaye, y como se esperaba los valores de  $G$  son mayores para una presión confinante mayor.

También se observa en la tabla 2.2 que los mayores valores de  $G$  corresponden a profundidades mayores, notándose más este efecto en

la estación SCT1; Así en dicha estación (Lago de Texcoco preconsolidado) G alcanza valores de hasta 665 Kg/cm<sup>2</sup> a profundidades de 35 m lo cual no sucede en los demás sitios; en CDAO se tienen valores del orden de 100 Kg/cm<sup>2</sup>, mientras que en TLHB y TLHD los valores son de 260 y 180 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, para profundidades y presiones de confinamiento similares.

Finalmente se puede concluir que los valores de G obtenidos de pruebas de columna resonante varían de mayor a menor valor en el siguiente orden, para los suelos de las ERA de interés:

SCT1 (Lago de Texcoco preconsolidado), TLHB y TLHD (Lagos de Xochimilco-Chalco) y CDAO (Lago de Texcoco virgen).

#### Triaxial cíclica (consolidación isotrópica, tabla 2.3).

Se observa que el valor de G aumenta en relación directa con la variación de la presión confinante, y como se esperaría, que en todos los sitios se obtienen valores de G menores que los determinados por medio de la columna resonante. Además cabe señalar que se conserva la tendencia mencionada arriba sobre la variación de G en las estaciones.

También se observa que ha medida que la profundidad y el confinamiento aumentan la diferencia entre los resultados de columna resonante y triaxial cíclica es más notoria, si comparamos los valores máximos de G encontrados para profundidades y presiones de confinamiento similares, se tiene que en la estación SCT1 el valor de G en columna resonante es de 665 y en triaxial cíclica es de 417 Kg/cm<sup>2</sup>, es decir existe una variación del 60%. Por el contrario, a profundidades y presiones de confinamiento menores que los anteriores la variación entre los valores de G es de un 30% a 40%.

En el sitio CDAO los valores de G son muy similares en ambas pruebas. En el caso de TLHD hasta los primeros 20 m, la variación de G, es de 10% a 15% mayor en pruebas de columna resonante, a profundidades de 35 m la diferencia es mayor de un 80% aproximadamente. Para TLHB no se tiene la información anterior.

En relación al parámetro G para muestras de arcilla de la zona centro de la ciudad de México, con contenidos de agua de 360% aproximadamente, se han realizado ensayos de triaxial cíclica con el fin de determinar el valor de G (ref. 8). En la tabla siguiente se presentan algunos resultados de dicho estudio.

Prof (m)	W (1/m <sup>3</sup> )	R (%)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	G (Kg/cm <sup>2</sup> )	D (%)	$\gamma_e$ (%)
9.80	1.11	17	57	19	8.5	0.384
10.60	1.09	22	41	14	9.3	0.688
11.20	1.10	29	37	12	9.7	1.006
11.30	1.09	33	34	11	10.6	1.407
11.70	1.09	50	28	9	11.3	2.311

donde:

W = Peso volumétrico, E = Módulo secante equivalente, G = Módulo de rigidez dinámico, R = Relación de esfuerzos, definida como  $q_e/q_{er}$  = Esfuerzo Axial cíclico/Esfuerzo Axial en falla estática, D = Relación de amortiguamiento,  $\gamma_e$  = Deformación angular cíclica.

Como se observa en estos casos los valores de G son función de la relación R, en estos ensayos no se sobrepasó el 50% de la resistencia en condiciones estáticas. Nótese que a medida que el valor de R aumenta el de G disminuye, tal efecto ya ha sido verificado en investigaciones anteriores (ref. 12) en las que se concluyó que para  $R < 83\%$  el efecto de la carga cíclica en la pérdida de resistencia es despreciable y para  $R > 83\%$  el efecto anterior es muy significativo.

b) Relación de amortiguamiento, D (tablas 2.2 y 2.3).

Los valores de amortiguamiento en el sitio SCT1 para los ensayos realizados varían entre 3 y 13 %, dependiendo de la profundidad. En este sitio se obtuvieron las relaciones de amortiguamiento menores. Entre 3 y 19 % es la variación que se tiene en CDAU, mientras que en TLHD los valores van de 4 a 14 %. En el caso del sitio TLHE solo se presenta información de columna resonante teniéndose valores mínimos de 4% y máximos de 16%. Los resultados entre si, en ambas pruebas son similares para todos los sitios.

c) Medición de la velocidad de propagación de la onda de cortante en suelos (refs. 7, 9, 10 y 11).

La fig. 2.3 muestra los valores de velocidad de propagación de la onda de cortante Vs, para el sitio SCT1, medidos con los métodos de la sonda suspendida (Ss) y down hole (Dh), se observa que los valores hasta 30 m de profundidad se encuentran entre 30 y 100 m/s. Para profundidades comprendidas entre 30 y 35 m existe un aumento brusco y se alcanzan valores de 350 m/s, posteriormente se tienen los valores de velocidad mas altos del orden de 600 m/s para

profundidades mayores a 40 m. En la misma figura se presentan los valores promedio considerando ambas pruebas. Estos pueden ser comparados con los valores de la tabla 2.4 en donde se muestran valores medios de Vs considerando diversos sitios dentro de la zona del lago de Texcoco preconsolidado.

La variación de la velocidad de onda de corte medida con Ss y Dh en el sitio CDAU se presenta en la fig. 2.4 se observa que en los primeros 40 m los valores de Vs fluctúan entre 30 y 80 m/s, posteriormente se presenta un incremento brusco hasta unos 250 m/s, para disminuir nuevamente a 100 m/s, lo anterior dentro del rango de 40 y 50 m, a continuación en medida que la profundidad aumenta poco los incrementos en Vs son grandes llegando a valores de 480 m/s aproximadamente a unos 65m de profundidad. Los valores promedio en estas pruebas se presentan en la misma figura. En la tabla 2.5 se encuentran, para una estratigrafía característica de la zona y considerando otros sitios, los valores medios de Vs obtenidos para CDAU.

En el caso del sitio TLHD, las mediciones realizadas con Ss y Dh muestran que los valores de Vs, con respecto a los sitios anteriores, son menores. Para profundidades mayores a 40 m alcanza sus valores máximos (300 m/s aproximadamente, fig. 2.5), mientras que para 10 y 20 m de profundidad Vs oscila entre 50 y 150 m/s.

La tabla 2.6 proporciona los valores medios de Vs respecto a la profundidad. La fig. 2.6 presenta los valores de Vs para el sitio TLHE, se nota una fluctuación de valores, pero creciente con la profundidad teniendo a 42 m el valor de Vs = 190 m, que es el máximo, a profundidades mayores de 50 m los valores se encuentran entre 80 y 150 m/s, los valores medios con la profundidad se encuentran en la tabla 2.7. Cabe señalar no obstante de encontrarse los sitios TLHB y TLHD en la misma zona (Xochimilco-Chalco) los valores de Vs en TLHB son menores.

Con los valores de Vs obtenidos se puede calcular el valor de G utilizando la expresión (ref. 5):

$$G = \rho V_s^2$$

donde:

$\rho$  es la masa específica (tal expresión es aplicable para amplitudes de deformación del orden de  $10^{-6}$ ).

Los valores de G así obtenidos para los diferentes sitios se muestran en la tabla 2.8. Estos valores de G se determinaron utilizando los valores de Vs obtenidos por el método de Dh.

La discusión anterior, sobre los valores de G y D obtenidos mediante diferentes tipos de pruebas para los suelos localizados en la vecindad de las ERA, nos conduce a considerar que los procedimientos de laboratorio llevan a resultados muy diferentes cuando se cambian las condiciones de ensaye. En teoría estas deberían reproducir en la mejor medida el comportamiento dinámico que el suelo tiene en el campo, de lo contrario se determinarán valores de sus propiedades mecánicas que implicarán incertidumbre muy grande en el comportamiento del material en el sitio.

Tipo de prueba	Propiedades que se miden	Condiciones de esfuerzo o deformación		Amplitud de deformación
		Iniciales	Dinámicas	
Triaxial cíclica	E, D Esfuerzo-deformación Resistencia	Consolidación Axisimétrica	Esfuerzo axial o confinante cíclico; esfuerzo de amplitud constante	$10^{-4}$ a $10^{-1}$
Torsión cíclica	G, D Esfuerzo-deformación	Consolidación Axisimétrica	Esfuerzo cortante cíclico, esfuerzo de amplitud constante o vibración libre	$10^{-4}$ a $10^{-2}$
Cortante simple cíclico	G, D Esfuerzo-deformación Resistencia	Consolidación bajo deformación lateral nula	Esfuerzo cortante cíclico, esfuerzo cortante constante o deformación constante o vibración libre	$10^{-4}$ a $10^{-2}$
Columna resonante	Vp, Vs, E, G, D	Consolidación Axisimétrica	Esfuerzo axial o torsional cíclico; deformación de amplitud constante	$10^{-4}$ a $10^{-2}$

E = Módulo dinámico de Young  
 G = Módulo dinámico de rigidez al cortante  
 D = Amortiguamiento  
 Vp = Velocidad de propagación de onda P  
 Vs = Velocidad de propagación de onda S

Tabla 2.1. Pruebas de laboratorio para determinar propiedades dinámicas en suelos, (adaptado de la Ref. 5).

Estación	Prof. (m)	Peso Vol. (T/m <sup>3</sup> )	Pres. Conf. (Kg/cm <sup>2</sup> )	Gmax (Kg/cm <sup>2</sup> )	D %	$\gamma \times 10^{-3}$ %
SCT1	12.00	1.130	0.50	27.00		2.53
			1.00	38.80		1.47
	20.90	1.191	0.90	74.52	3.30	2.78
			1.80	130.30	3.13	2.76
	35.00	1.461	1.10	434.00	9.21	6.86
2.20			665.00	8.78	4.96	
CDA0	12.85	1.120	0.50	28.00	5.10	3.35
	31.80	1.180	0.90	35.30	10.80	6.93
			1.80	74.98	7.40	4.03
	38.20	1.160	1.00	60.80	7.70	4.91
			2.00	99.70	7.50	3.22
TLHD	10.60	1.190	0.55	47.50	10.00	4.83
			1.10	66.40	13.57	4.36
	22.40	1.340	0.80	118.00	4.98	2.82
			1.60	680.00	3.53	1.07
34.90	1.200	1.25	245.00	4.21	2.63	
		2.50	262.00	2.54	3.39	
TLHB	5.00	1.234	0.48	49.60	8.40	4.50
	13.90	1.344	0.73	48.82	13.77	3.28
			1.46	85.83	10.66	3.39
	21.20	1.307	0.93	85.30	12.80	1.60
			1.86	146.30	14.00	1.26
	26.50	1.134	1.13	93.00	17.30	1.60
	26.50	1.206	2.26	273.90	7.80	4.00
			1.40	100.40	10.70	2.34
	35.20	1.239	2.80	179.30	10.13	1.93
			1.55	136.00	4.93	3.35
	40.00	1.301	3.10	243.00	9.60	1.56
			1.80	215.90	6.09	1.17
47.60	1.334	3.60	364.63	15.76	5.98	
		2.05	209.10	10.21	6.94	
54.90	1.341	4.10	443.00	9.94	4.43	

Tabla 2.2 Determinación de los valores G y D por medio de ensayos en columna resonante (adaptado de la ref. 7).

Estación	Prof. (m)	Peso Vol. (T/m <sup>3</sup> )	Pres. Conf. (Kg/cm <sup>2</sup> )	G <sub>max</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )	D %	$\gamma \times 10^{-2}$ %	
SCT1	12.00	1.115	0.50	13.08	6.74	9.54	
				11.91	7.79	21.70	
				11.24	6.21	42.60	
				1.00	25.25	4.33	7.88
				24.55	3.72	31.70	
			22.46	4.17	67.40		
			20.92	2.91	80.70		
			20.10	4.19	96.30		
			16.56	5.36	129.00		
			20.90	1.202	0.90	52.82	8.19
	45.41	2.94	20.80				
	43.51	2.85	26.10				
	43.39	3.02	36.50				
	38.45	4.02	48.70				
	1.80	66.94	5.98			3.05	
	64.07	3.48	8.63				
	63.22	4.27	14.70				
	60.50	2.33	20.90				
	50.83	2.36	42.60				
	44.06	3.64	61.40				
	39.47	3.36	80.70				
	35.96	3.57	111.00				
	35.30	1.439	1.10	269.00	6.00	2.00	
	246.00			12.00	4.00		
	157.00			13.00	7.00		
	147.00			11.00	9.00		
	123.00			10.00	12.00		
	116.00			9.00	16.00		
	106.00			9.00	19.00		
	2.20			417.00	5.00	2.00	
337.00	4.50			4.00			
293.00	7.00			5.00			
194.00	8.00	9.00					
163.00	5.00	20.00					
CDA0	12.57	1.140	0.50	20.10	10.71	3.91	
				15.30	7.71	13.60	
				14.50	5.38	21.20	
				1.00	47.90	11.05	1.82
				44.00	5.74	5.05	

Tabla 2.3. Determinación de los valores G y D mediante ensayos de triaxial cíclica, (consolidación isotrópica), (adaptado de la ref. 7).

Estación	Prof. (m)	Peso Vol. (T/m <sup>3</sup> )	Pres. Conf. (Kg/cm <sup>2</sup> )	Gmax (Kg/cm <sup>2</sup> )	D %	$\gamma \times 10^{-2}$ %
				35.70	6.29	6.20
				28.00	5.53	13.50
				23.90	7.53	51.50
				21.20	12.75	47.50
	32.00	1.167	0.90	37.60	10.07	4.84
				31.10	5.27	15.60
				30.00	4.41	25.80
				28.10	3.86	67.80
				24.40	3.89	102.00
				22.80	5.26	131.00
			1.80	73.80	5.07	7.40
				70.80	4.90	17.00
				65.60	4.45	25.00
				63.40	3.75	37.00
				60.60	4.19	53.40
	38.20	1.192	1.00	67.00	19.00	2.00
				60.00	16.00	6.00
				59.00	14.00	16.00
				43.00	5.00	25.00
			2.00	114.00	13.00	1.80
				106.00	7.00	4.40
				95.00	8.00	10.00
				67.00	6.00	42.00
TLHD	10.60	1.162	0.55	55.00	7.00	2.20
				40.50	4.00	6.10
				28.30	4.00	9.10
			1.10	58.00	8.00	2.10
				53.00	5.00	5.70
				51.00	6.00	16.00
				37.00	5.00	51.00
	22.90	1.334	0.80	103.00	8.00	3.20
				77.40	9.50	13.00
				66.30	5.30	16.10
			1.60	84.20	11.00	4.70
				81.80	12.00	9.10
				81.00	6.00	17.50
				71.00	4.60	32.00

Tabla 2.3. (Continuación).

Estación	Prof. (m)	Peso Vol. (T/m <sup>3</sup> )	Pres. Conf. (Kg/cm <sup>2</sup> )	Gmax (Kg/cm <sup>2</sup> )	D %	$\gamma \times 10^{-2}$ %
	34.90	1.230	1.25	112.00	4.80	5.00
				98.00	7.00	11.00
				91.00	8.00	14.00
			2.50	142.00	4.50	4.60
				126.00	5.90	11.30
				107.00	5.12	29.60
				100.00	6.70	41.00

Tabla 2.3. (Continuación).

Estrato	Espesor (m)	Vs (m/s)
Capa superficial	H < 4	118
F A S	4 < H < 32.5	64
Capa Dura	32.5 < H < 36.5	267
F A I	36.5 < H < 47	180
Depositos profundos	H > 47	506

H = Espesor  
Vs = Velocidad media de onda de cortante  
FAS = Formación arcillosa superior  
FAI = Formación arcillosa inferior

Tabla 2.4 Valores medios de propagación de velocidad de onda de cortante en el sitio SCT1, (adaptado de la ref. 7).

Estrato	Espesor (m)	Vs (m/s)
Capa superficial	H < 4	113
F A S	4 < H < 32.5	54
Capa Dura	32.5 < H < 36.5	192
F A I	36.5 < H < 47	134
Depositos profundos	H > 47	358

H = Espesor  
Vs = Velocidad media de onda de cortante  
FAS = Formación arcillosa superior  
FAI = Formación arcillosa inferior

Tabla 2.5 Valores medios de propagación de velocidad de onda de cortante en el sitio CDAO, (adaptado de la ref. 7).

Estrato	Profundidad (m)	Vs (m/s)
1	5 - 6	56
2	6 - 10	145
3	10 - 40	81
4	40 - 42	317
5	42 - 48	154
6	48 - 57	284
7	58 - 66	158

Vs = Velocidad media de onda de cortante

Tabla 2.6 Valores medios de propagación de velocidad de onda de cortante en el sitio ILHD, (adaptado de la ref. 7).

Estrato	Profundidad (m)	Vs (m/s)
1	2 - 27	53
2	28 - 43	87
3	44 - 56	118
4	57 - 68	102
5	69 - 76	106

Vs = Velocidad media de onda de cortante

Tabla 2.7 Valores medios de propagación de velocidad de onda de cortante en el sitio ILHB, (adaptado de la ref. 7).

Estación	Prof. (m)	Peso Vol. (T/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	G (Kg/cm <sup>2</sup> )
SCT1	0 - 6	1.666	96	157
	6 - 8	1.408	48	33
	8 - 11	1.234	33	14
	11 - 21.5	1.215	54	36
	21.5 - 26	1.238	74	69
	26 - 30	1.303	94	117
	30 - 36	1.612	317	1651
	36 - 38.5	1.380	139	272
CDAO	0 - 6	1.377	100	140
	6 - 12	1.289	40	21
	12 - 16	1.147	31	11
	16 - 18	1.216	77	74
	18 - 22.5	1.155	35	14
	22.5 - 26	1.247	57	41
	26 - 27.5	1.141	35	14
	27.5 - 32	1.205	82	83
	32 - 34	1.237	45	26
	34 - 40.5	1.267	62	50
	40.5 - 43	1.480	180	489
TLHD	0 - 7.5	1.409	78	87
	7.5 - 10	1.197	164	328
	10 - 16	1.198	67	55
	16 - 19	1.265	73	69
	19 - 24	1.310	105	147
	24 - 28	1.239	64	52
	28 - 33	1.390	91	117
	33 - 36	1.494	71	77
	36 - 40	1.410	100	144
	40 - 50	1.436	155	352
	50 - 62	1.318	109	160
	62 - 65	1.353	200	552
	65 - 70	1.368	471	3094
TLHB	0 - 2	1.750	200	714
	2 - 7	1.600	60	59
	7 - 9	1.150	100	117

Tabla 2.8 Determinación de G utilizando los valores de Vs obtenidos por medio de Down-Hole.

Estación	Prof. (m)	Peso Vol. (T/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	G (Kg/cm <sup>2</sup> )
9 - 18		1.200	50	31
18 - 25		1.350	65	58
25 - 29		1.200	45	25
29 - 31		1.200	95	110
31 - 36		1.450	90	120
36 - 41		1.350	90	112
41 - 44		1.300	80	85
44 - 53		1.350	115	182
53 - 57		1.400	110	173
57 - 63		1.300	90	107
63 - 69		1.300	110	160
69 - 72		1.260	110	155
72 - 73		1.500	110	185
73 - 77		1.300	105	146
77 - 84		1.400	150	321
84 - 91		1.250	60	46
91 - 110		1.250	60	46
110 - 116		1.350	100	138

Tabla 2.8 (Continuación).

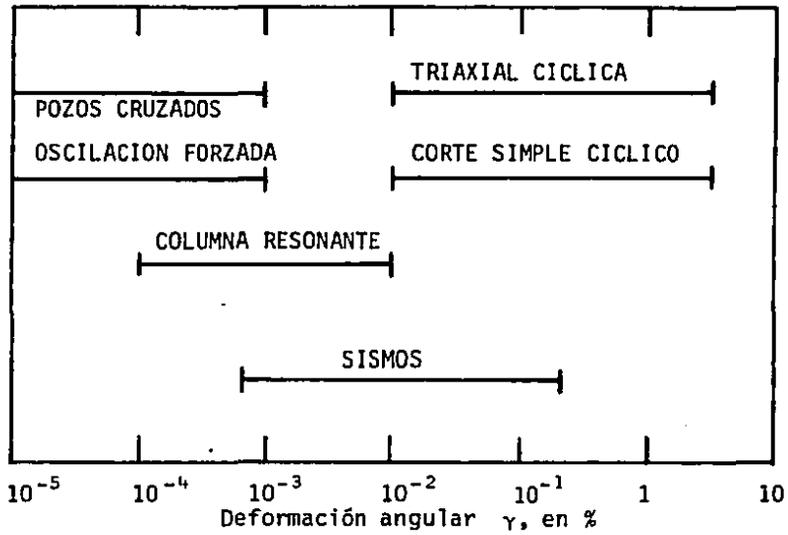


Fig. 2.1 Pruebas de campo y de laboratorio para determinar propiedades dinámicas en suelos, (Adaptado de la ref. 7).

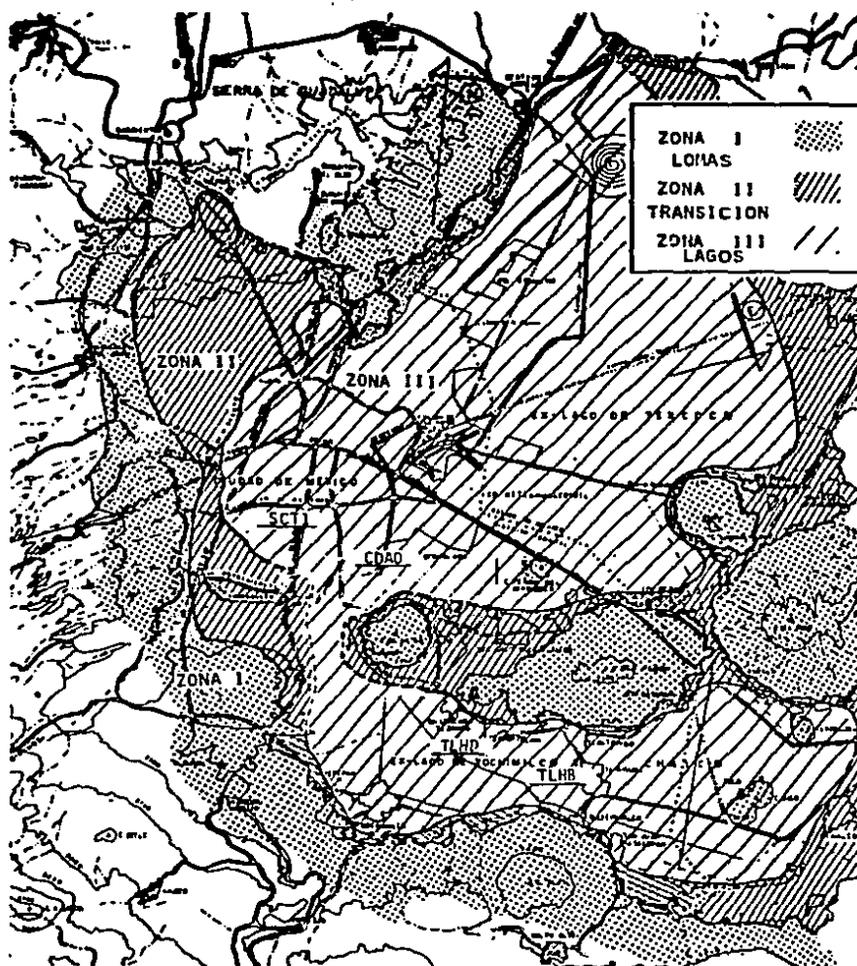


Fig 2.2 Localización de las Estaciones de Registro de Aceleración (ERA) incluidas en este trabajo Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT1), Central de Abasto Oficina (CDAO), Tiáhuac Deportivo (TLHD) y Tiáhuac Bombas (TLHB).

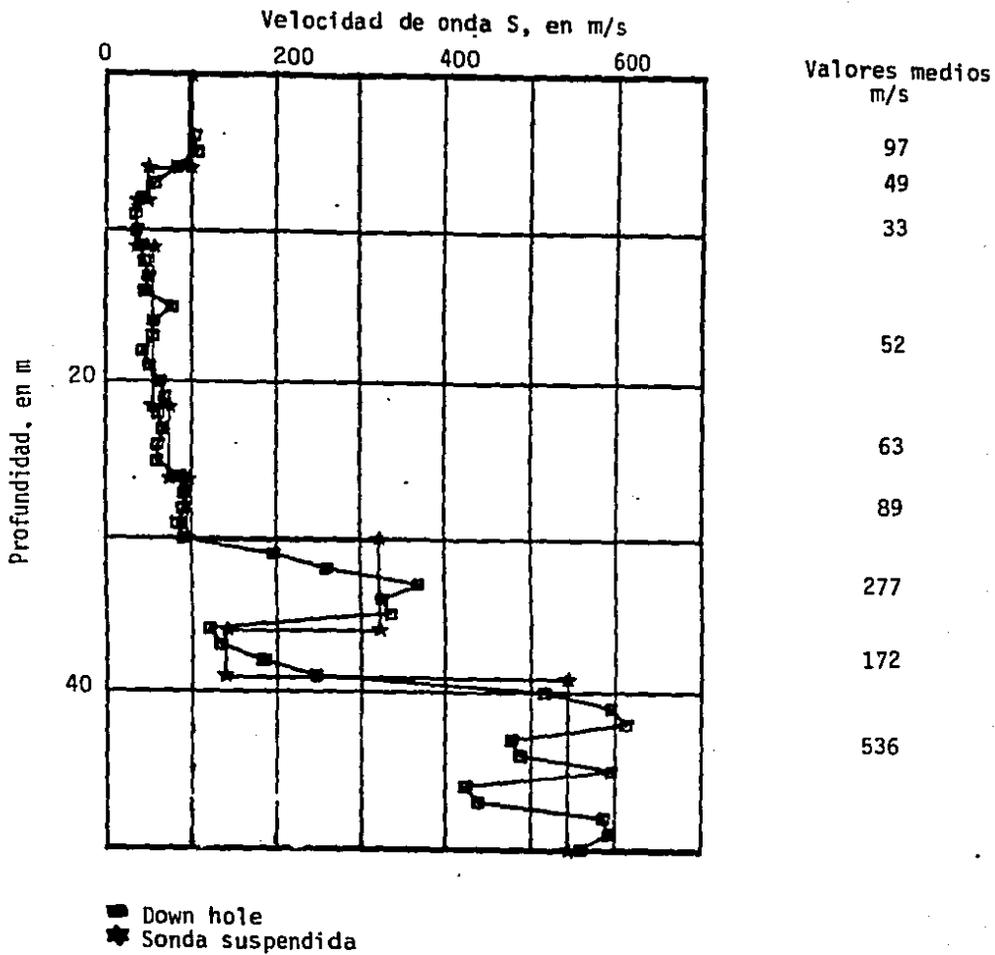


Fig. 2.3 Velocidad de propagaación de onda S, en el sitio SCT1, (Ref. 9).

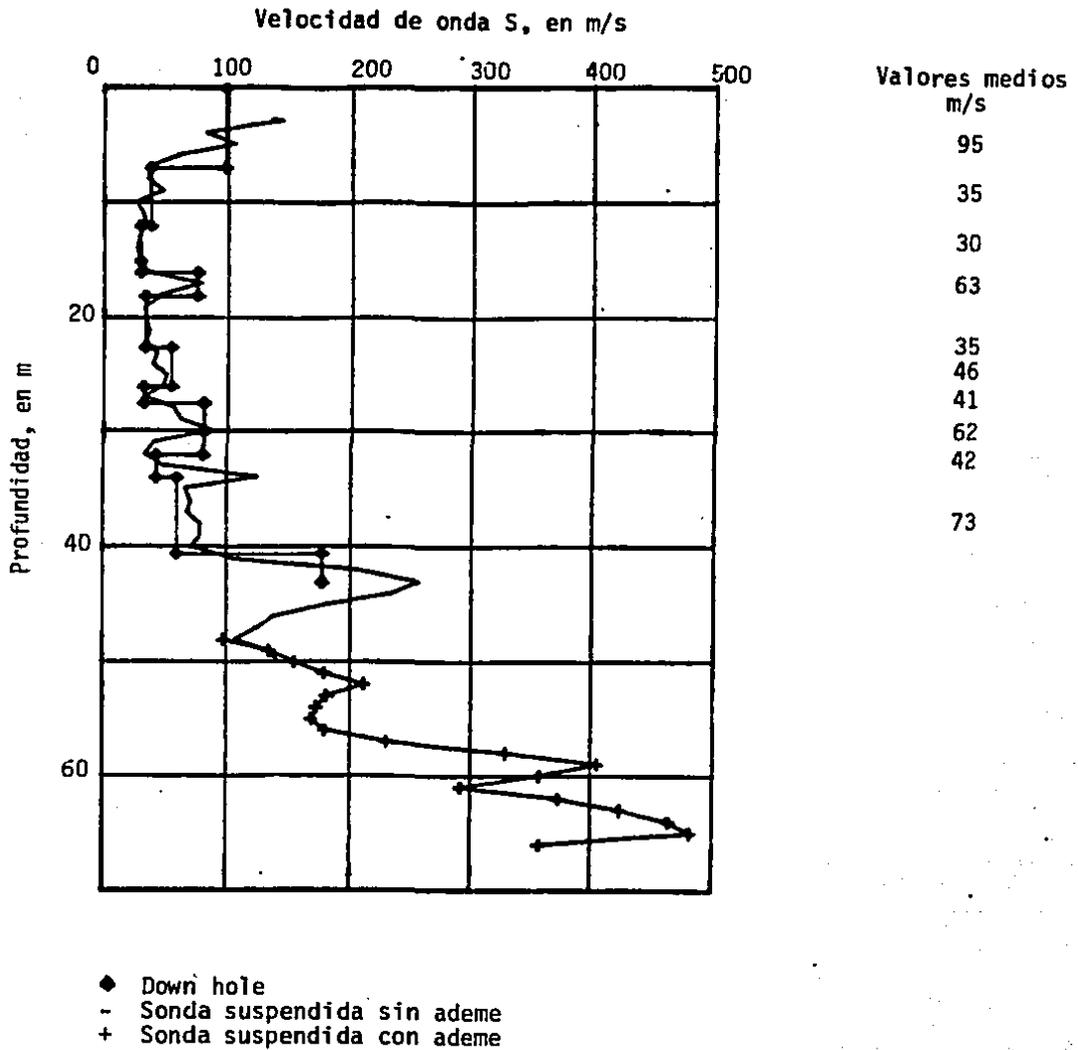


Fig. 2.4 Velocidad de propaación de onda S, en el sitio CDAO, (Ref. 10).

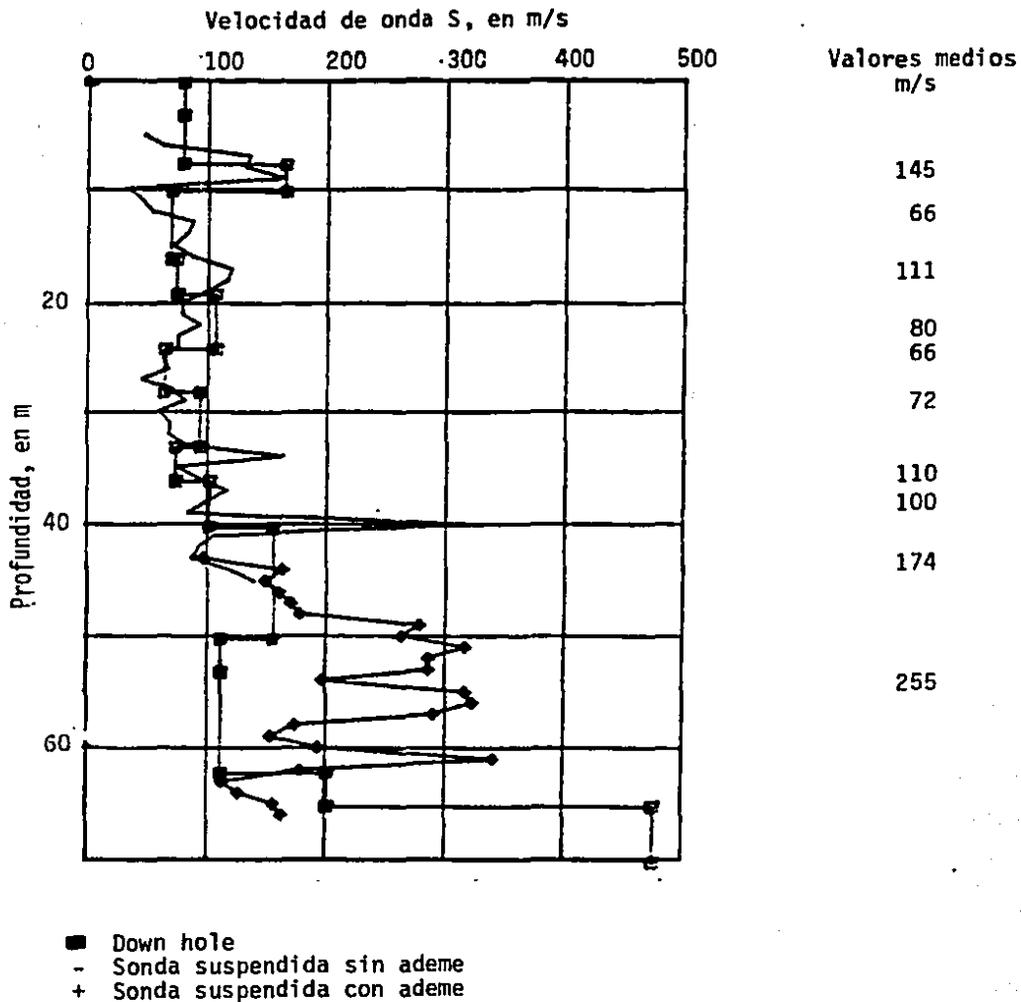


Fig. 2.5 Velocidad de propagación de onda S, en el sitio TLHD, (Ref. 11).

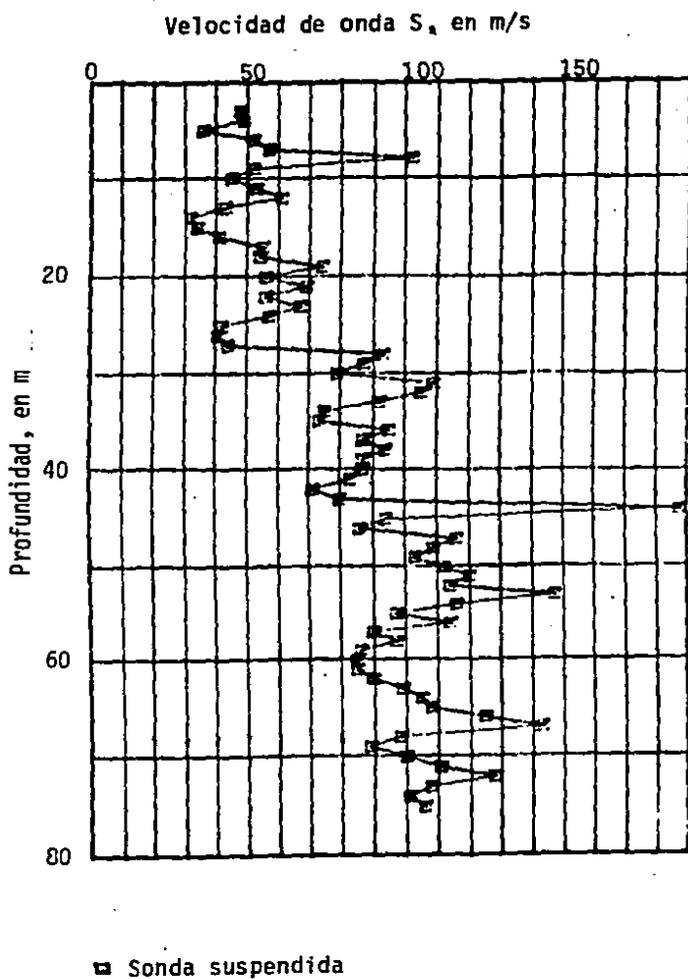


Fig. 2.6 Velocidad de propagación de onda  $S_1$ , en el sitio TLHB, (Ref. 7).

### 3. CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS DE LAS ESTACIONES DE INTERES

En este capítulo se presentan las características geométricas y mecánicas (tipo de material) de las cuatro estaciones de registro de aceleración de interés para este trabajo. Como a continuación se detallará las estaciones CDAO, TLHB y TLHD tienen una caseta que les sirve de resguardo, la de SCT1 solo está constituida de una base de concreto reforzado.

#### 3.1 Estación de registro de aceleración, Central de abasto oficina (CDAO).

La estación CDAO se encuentra localizada al oriente de la ciudad de México (fig 2.2), en las oficinas de la Central de Abasto, dentro de un edificio de un nivel. La ubicación de la estación se muestra en la figura 3.1.

La ERA está constituida de una caseta y de una base (figs 3.2 y 3.3). La caseta con una altura de 156 cm tiene en planta las siguientes dimensiones 152 x 137 cm, fué construida con castillos de concreto reforzado y muros de tabique, estos están sobre dalas de cimentación. El techo de la caseta consta de una losa de concreto reforzado de 10 cm de espesor. Los muros se encuentran separados de las paredes de la estructura huésped pero no de la losa de piso de la misma.

La base del acelerógrafo se localiza en el interior de la caseta (fig 3.3) y es de concreto reforzado, tiene 40 cm de altura y una planta de 60x41 cm, y aunque no se ha podido confirmar, se supone que está enterrada aproximadamente 1 m. Al pie de la base del acelerógrafo existe una separación con la losa de piso de unos 5 cm, la cual se encuentra rellena de material deformable (tipo cartón).

#### 3.2 Estación de registro de aceleración, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT1).

La estación SCT1 se encuentra en la zona centro de la ciudad de México (fig 2.2), en el antiguo centro SCOP, hoy ocupado por instalaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. La ERA se localiza en uno de los patios del conjunto, cerca de la esquina de Av. Universidad y Xola (fig 3.4a) y de un edificio de concreto reforzado.

En este caso la ERA se encuentra constituida unicamente por una base se de concreto armado (figs 3.4b, c y d), con dimensiones en planta

de 108 x 90 x 130 cm. Su altura sobre el nivel del terreno es de 30 cm. Tiene muros de concreto reforzado de 15 cm de espesor, desplantados a una profundidad de 1m en donde son ligados por medio de una losa de concreto armado de 15 cm.

### 3.3 Estación de registro de aceleración, Tláhuac Bombas (TLHB).

En la población de Tláhuac, dentro de la zona centro de los exlagos de Xochimilco-Chalco, se encuentra ubicada la ERA TLHB en San Pedro Tláhuac (fig. 3.5).

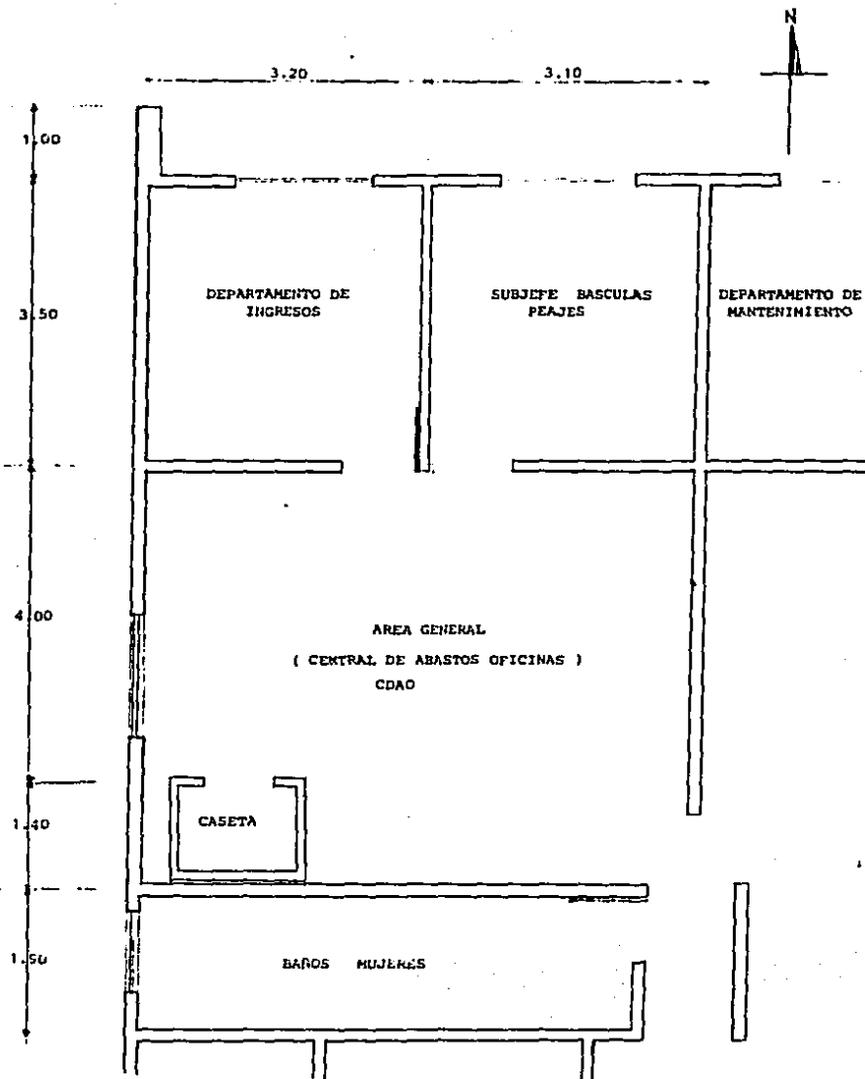
La estación se aloja en una instalación de bombeo de la SARH (figs 3.6 y 3.7) y está constituida por una caseta de resguardo construida de castillos de concreto reforzado y muros de tabique. Los muros frontal y posterior tienen alturas de 265 y 235 cm sobre el nivel del terreno respectivamente, en planta las dimensiones son 254 x 253 cm, además tiene una losa de piso de 10 cm, que está en contacto con un muro de mampostería, localizado fuera de la caseta.

En el interior de la caseta (figs 3.6 y 3.7) se tiene la base del acelerógrafo de 50 cm de altura y una planta de 51 x 59 cm. También en este caso se ignora a que profundidad está enterrada la base. Del pie de la base a una distancia aproximada de 40 cm en toda su periferia, existe un hueco en la losa de piso de la caseta de unos 4 x 10 cm; dicho hueco está relleno de material de gravilla.

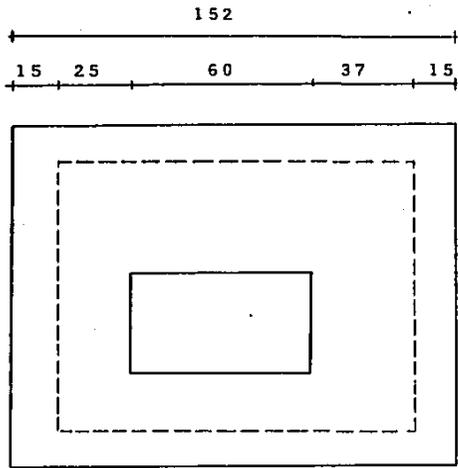
### 3.4 Estación de registro de aceleración, Tláhuac Deportivo (TLHD).

La ERA denominada TLHD se localiza en el poblado de San Francisco Tlaltenco en Tláhuac, dentro de unas instalaciones deportivas del lugar. La ubicación se presenta en la fig. 3.5.

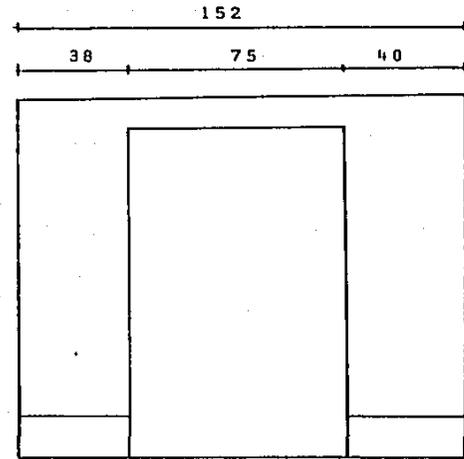
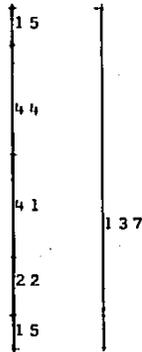
La estación es prácticamente idéntica a la descrita en el punto 3.3 para TLHB, las únicas diferencias existentes son: la separación entre la losa de piso y la base (donde se colocan los instrumentos) se inicia al pie de esta, y la otra es que la losa de piso de TLHB está en colindancia con un muro de mampostería. Los detalles de la geometría en la estación TLHD se muestran en las figs. 3.8 y 3.9.



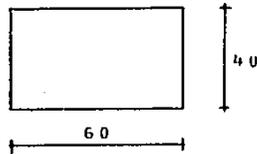
3.1 Localización de la estación Central de Abasto Oficina (CDAO).



(a)



(b)



(c)

Acotaciones en cm

Fig. 3.2 Características geométricas de la estación Central de Abasto Oficina (CDAO).  
 a) Planta b) Vista frontal c) Vista frontal de la base

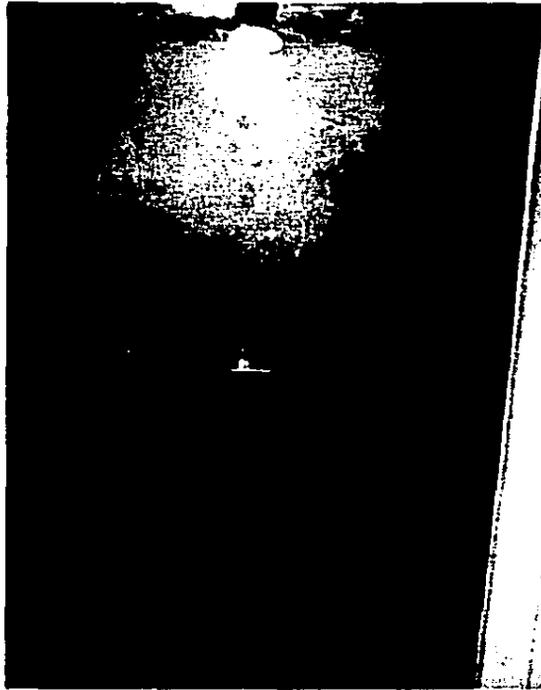
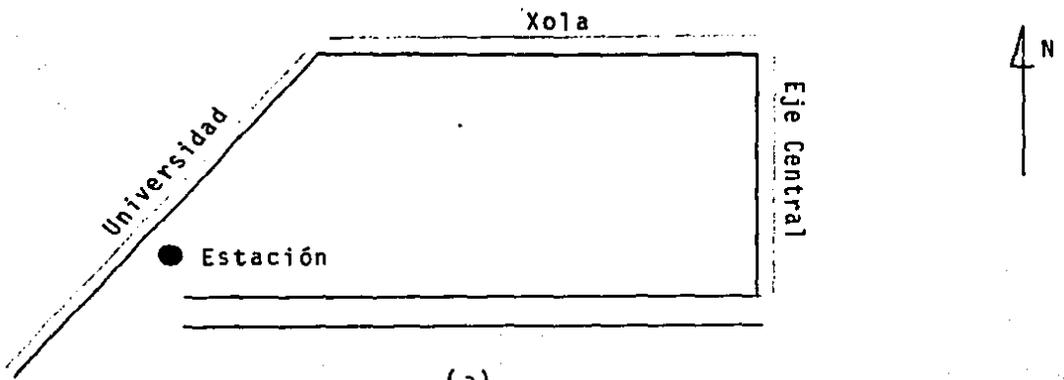
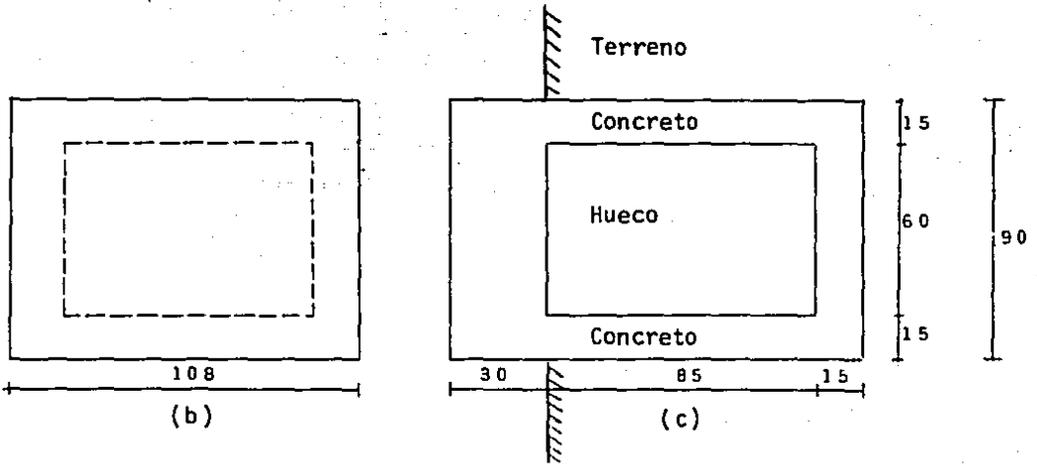


Fig 3.3 Estación de registro de aceleración Central de Abastos Oficina.

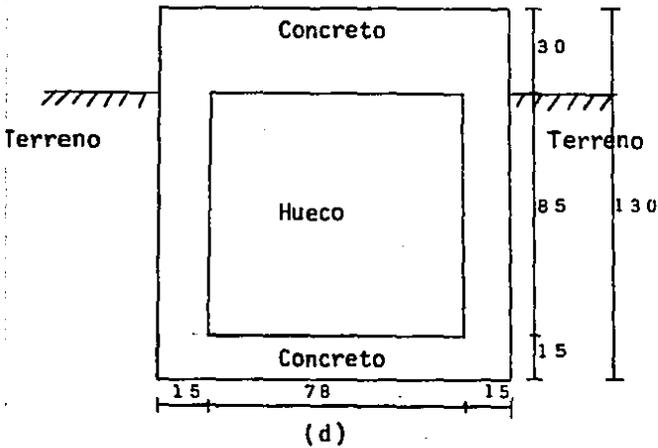


(a)



(b)

(c)



(d)

Acotaciones en cm

Fig. 3.4 Características geométricas de la estación Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). a) Localización b) Planta c) Vista lateral d) Vista frontal

+ 99.035W

+ 99.008W

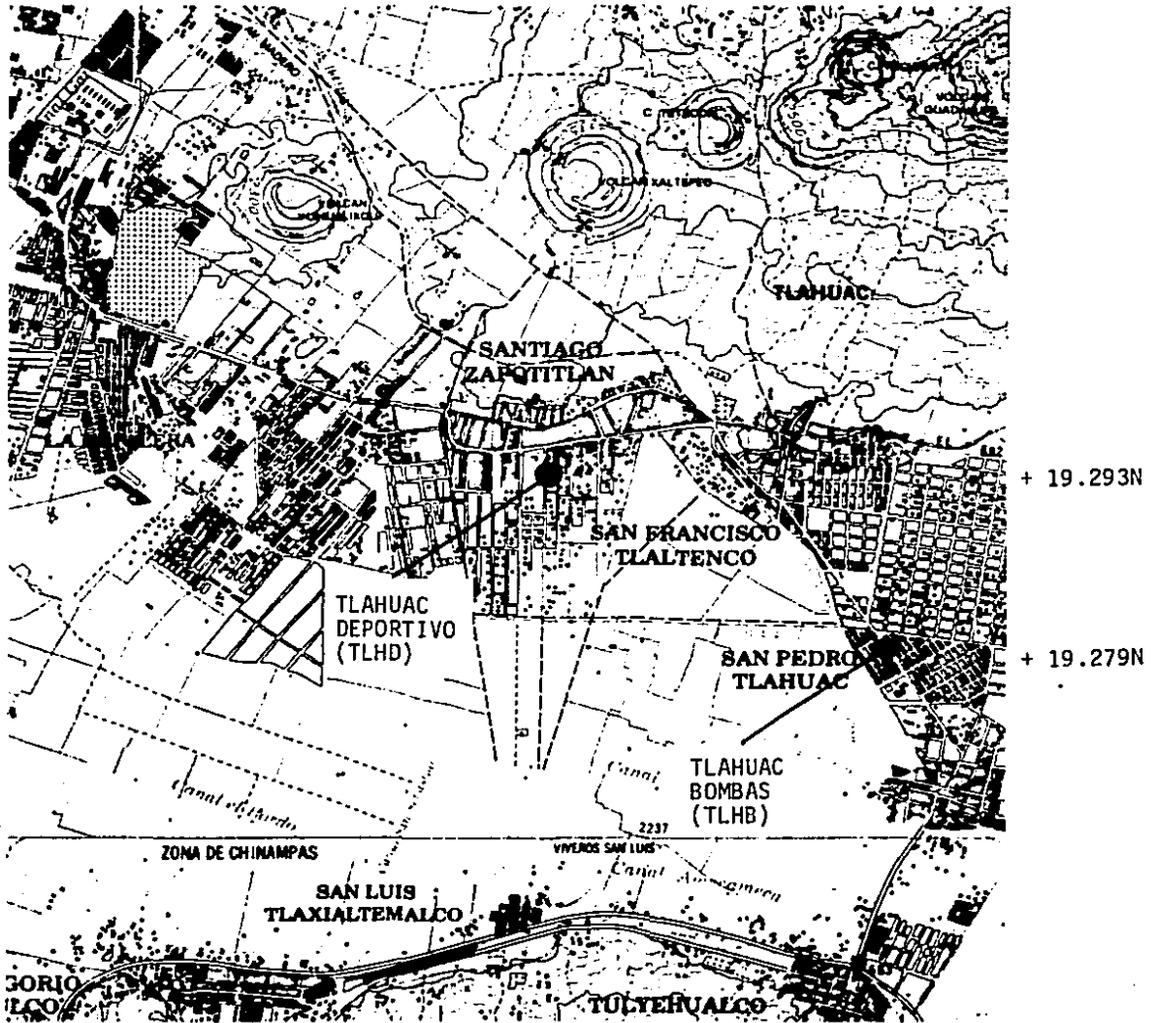


Fig. 3.5 Localización de las estaciones de Tláhuac Bombas (TLHB) y Tláhuac Deportivo (TLHD).

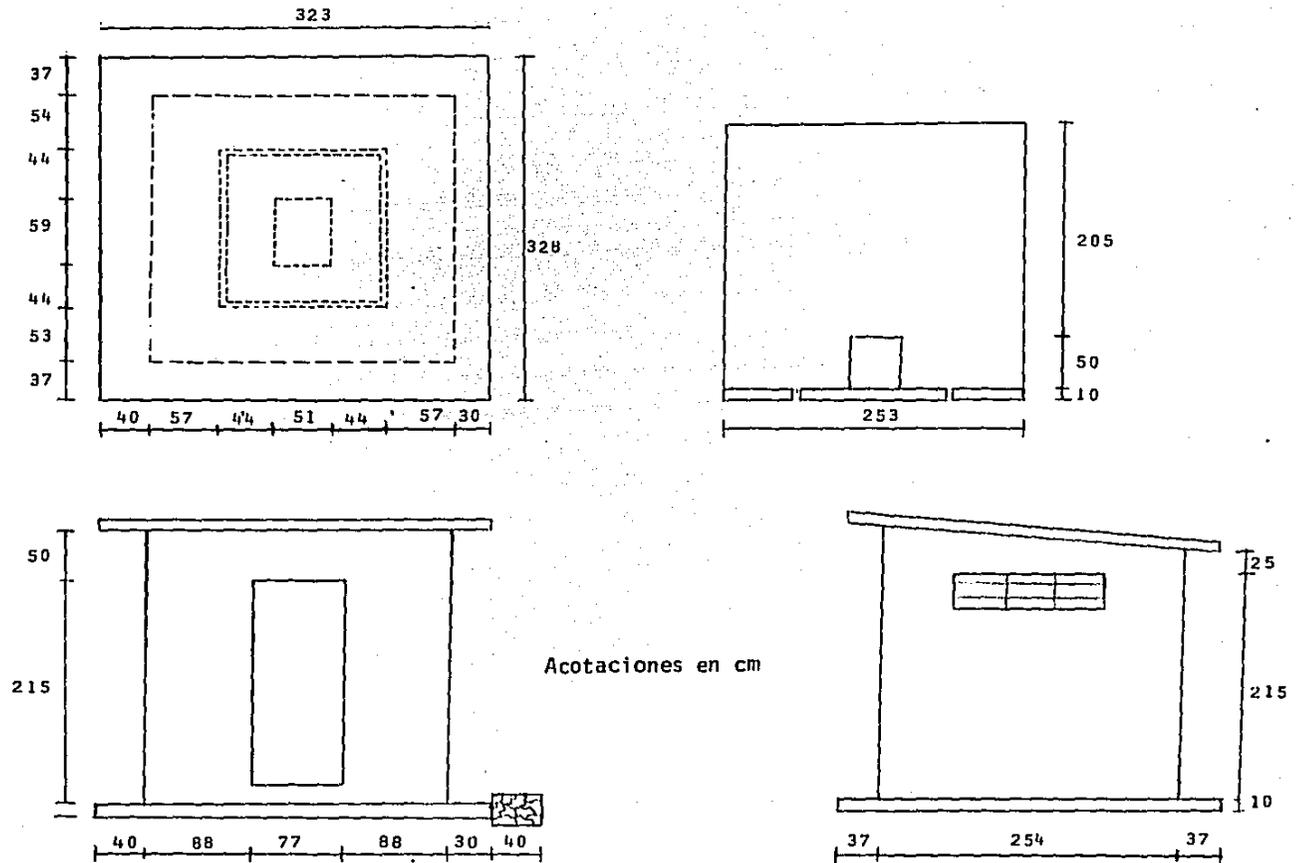


Fig. 3.6 Características geométricas de la estación Tláhuac Bombas (TLHB).  
 a) planta b) Vista frontal de la base c) Vista frontal d) Vista lateral



Fig 3.7 Estación de registro de aceleración Tláhuac Bombas.

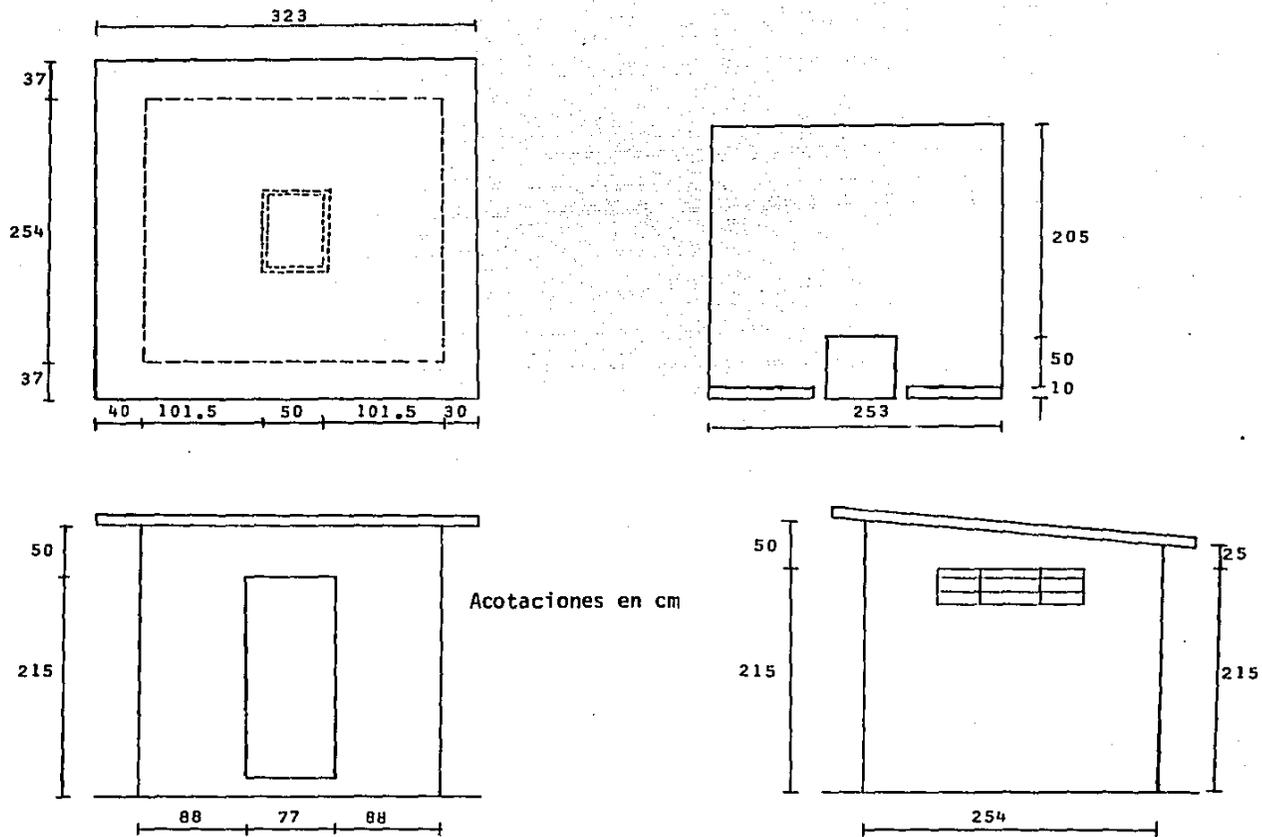


Fig. 3.8 Características geométricas de la estación Tláhuac Deportivo (TLHD).  
 a) Planta b) Vista frontal de la base c) Vista frontal d) Vista lateral

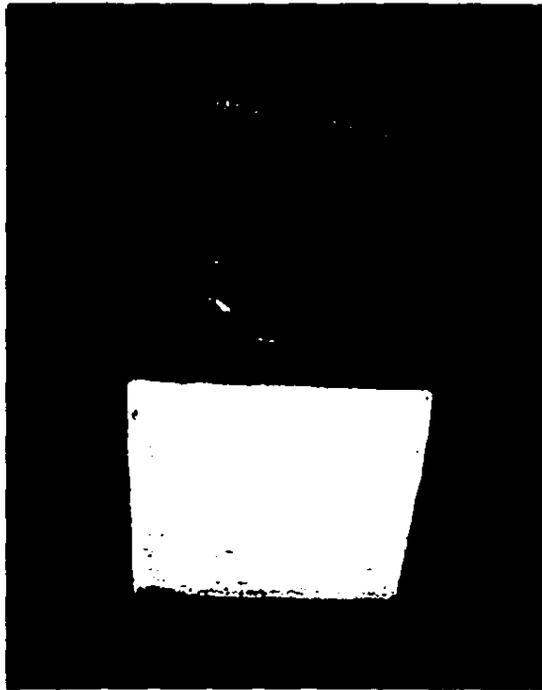
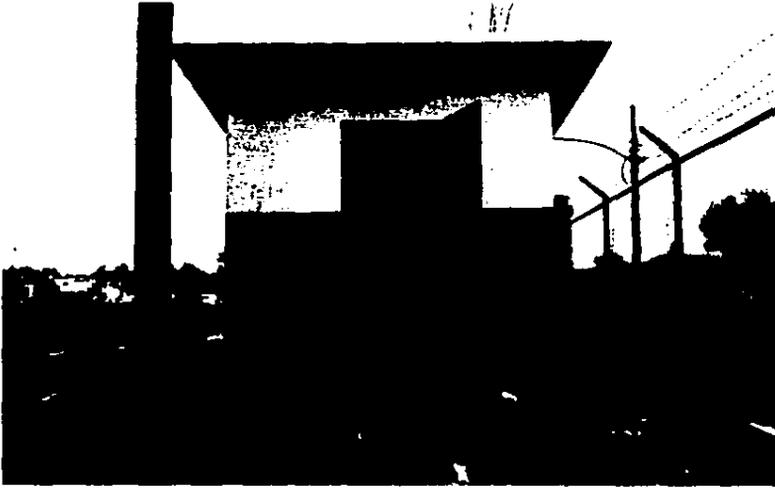


Fig 3.9 Estación de registro de aceleración Tláhuac Deportivo.

#### 4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE LOS EFECTOS DE INTERACCION SUELO ESTRUCTURA EN LAS ESTACIONES DE INTERES.

Para analizar el posible efecto de interacción suelo-estructura (inciso 1.2) en las estaciones de registro de aceleración (ERA) se procedió a realizar un estudio experimental en éstas, el cual se basa en la técnica de microtemblores, que consiste en el registro de ruido sísmico en sitios de interés mediante la utilización de instrumentos tales como sismógrafos o acelerógrafos suficientemente sensibles. La cuantificación de los efectos de interacción suelo-estructura en las ERA es importante, debido a que estos se traducen ya sea en amplificaciones y/o deamplificaciones de los movimientos generados por un sismo o alteración del contenido de frecuencias en la señal sísmica al ser registrada en la ERA. Algunos autores han encontrado tales efectos (ref. 14), y han determinado que para los acelerogramas en cuestión los espectros de respuesta fueron amplificados hasta en un 30%. Recientemente se han observado efectos de amplificación (ref. 15) en la estación acelerográfica localizada en la Presa José Ma. Morelos (La Villita). En esta estructura existen dos estaciones de registro de aceleración VILC y VILT separadas unos 5 m; la primera está constituida de una caseta con dimensiones en planta de 276 x 346 cm y altura de 215 cm, además cuenta con una base sobre la cual se coloca el instrumento de registro. La estación VILT solo está formada de una base de concreto reforzado de 60x100 cm y enterrada 150 cm, sobre ella se encuentra anclada una caja metálica en cuyo interior se ubica el acelerógrafo. Ambas estaciones registraron un sismo en febrero 8, de 1988 y al calcular la razón entre las transformadas de Fourier de amplitud de aceleración para el componente transversal, se encontró que el registro en VILC tiene amplitudes mayores que el de VILT en un orden de 2 veces (fig. 4.1) para diversos rangos de frecuencia.

Los hechos citados arriba hacen suponer un posible efecto de interacción suelo-estructura en las ERA por lo que se consideró importante realizar un estudio experimental en algunas de las estaciones en que se tiene registro de los sismos de septiembre de 1985.

##### 4.1 Descripción de la técnica de microtemblores

El medir microtemblores es en esencia registrar en sitios de interés, por medio de sismógrafos o acelerómetros, el ruido sísmico producido por: tráfico vehicular, vibraciones industriales, variaciones de la presión atmosférica, oleaje, etc. Después de los sismos de septiembre de 85 Kobayashi et al (refs. 16 y 17) realizaron mediciones de microtemblores en varios sitios en el D.F., y encontraron que existía similitud entre el espectro de Fourier de velocidad del microtemblor con el espectro de respuesta de

aceleración de un temblor, registrado en el mismo sitio. Por lo que se propuso utilizar esta técnica para realizar una microzonificación del Valle de México, (ref. 18).

Es decir en base a un registro de microtemblores en un sitio se puede determinar su periodo natural de vibrar. Lo anterior fue tomado en cuenta para considerar la utilización de ésta técnica en el estudio de interacción suelo-estructura en las ERA.

#### 4.2 Aplicación de la técnica de microtemblores para estudiar los efectos de interacción suelo-estructura en las estaciones de registro de aceleración.

Los registros de sismos obtenidos en las estaciones acelerográficas en el Valle de México muestran que las máximas amplitudes están asociadas a periodos comprendidos en el intervalo de 0.1 a 5 s (refs. 2, 3 y 19) por esta razón se decidió utilizar como sistema de registro de ruido sísmico, 3 sismómetros marca Kinometrics con sus respectivos registradores DR-100 marca Sprengnether. Los sismómetros, con período natural de 5 s, registran los movimientos del terreno, uno en dirección vertical y los otros dos en direcciones horizontales ortogonales.

Previo a su utilización los sismómetros son calibrados, un ejemplo de ello se muestra en las curvas de magnificación de la fig 4.2. se puede apreciar que los instrumentos tienen una respuesta plana en la banda de frecuencias comprendida entre 0.2 y 20.0 Hz para registros de velocidad. Información más detallada de las características de los instrumentos se presenta en las tablas 4.1 a 4.5. La adquisición de los datos es por medio de cinta magnética en casete, con una velocidad de muestreo de 100 muestras por segundo.

Para la ejecución del experimento se utilizó un par de sistemas de registro (constituidos cada uno de 3 sismómetros y un registrador) uno de ellos se denominó fijo y el otro móvil, el primero se colocó en la base de la ERA y se mantuvo en ese sitio durante todo el desarrollo del experimento. El sistema móvil se colocó en puntos, previamente seleccionados, fuera de la estación acelerográfica y a una cierta distancia de la misma. Una vez instalados los sistemas fijo y móvil se procedió a realizar el registro de ruido sísmico, haciendo accionar simultáneamente los aparatos, durante un lapso de 2 a 3 minutos; en ese intervalo se evita el paso de peatones ó vehículos cerca de los sismómetros con el fin de eliminar este tipo de ruido en el registro de la señal. Después se cambió el sistema móvil a otro sitio y se repitió el procedimiento hasta terminar con los puntos seleccionados.

#### 4.3 Diseño del experimento para las estaciones de registro de aceleración

Las mediciones se efectuaron entre las 10 y las 18 horas debido a que estudios de estacionaridad (ref. 18) han mostraron que entre las 6 y 22 horas las relaciones señal ruido son las mas adecuadas para los fines del estudio y es cuando se presentan las mayores amplitudes.

La figura 4.3 muestra los sitios seleccionados en la estación CDAO (puntos 001 al 004), la alineación de estos corresponde a la dirección este-oeste (E-O), por condiciones de la estructura en la que se encuentra la ERA (fig. 3.1) no fué posible realizar mediciones en la dirección N-S.

En la estación SCT se realizaron mediciones en las direcciones N-S (puntos 005 a 008) y E-O (puntos 001 a 004) tal como se muestra en la figura 4.4.

Para la estación TLHD solo se cuenta con 3 sitios de medición, el 004 en dirección E-O y los 005 y 006 en la dirección N-S (fig. 4.5).

Los sitios de registro en la estación TLHB son mostrados en la fig. 4.6. Se realizaron 3 mediciones en la dirección E-O (puntos 001 a 003) y 4 en la dirección N-S de ellos 3 se localizan en la parte posterior de la ERA y uno (004) en la parte frontal.

#### 4.4 Procesamiento de la información

Una vez que se tiene un registro de ruido sísmico (señal tiempo-velocidad) se procede a la lectura y transmisión de datos a una computadora en la que se realizará el análisis. Esto se hace utilizando una interfase (serie RS-232) y un paquete de programas que recibe, demultiplexa y convierte a un formato accesible los datos. Hecho lo anterior se gráfica la señal velocidad-tiempo, para cada una de las componentes, con la finalidad de seleccionar una ventana que tenga la mejor relación señal-ruido, esto se hace para los registros tanto del sistema fijo como del móvil. Las figuras 4.7 a 4.14 muestran los registros obtenidos en las estaciones de registro de aceleración para un solo sitio, tanto del sistema fijo como del móvil y la tabla 4.6 proporciona los datos de las ventanas seleccionadas para los registros de cada punto de las estaciones acelerográficas.

Con los datos de la ventana seleccionada se procede al cálculo de los espectros de Fourier de amplitud de velocidad para los tres componentes. Estos datos son suavizados calculando el promedio de las amplitudes dentro de una banda de un 1/3 de octava, en las figs. 4.15 a 4.32 se presentan los espectros de fourier de amplitud de velocidad suavizados para los tres componentes, en la parte superior

de la gráfica se indica si corresponde al sistema fijo o al móvil y el punto en el que se encontraba este último al realizar la medición, también se agrega el valor del tamaño de la ventana seleccionada.

Para determinar si existen efectos de interacción suelo-estructura en las diversas estaciones, con los datos de los espectros de fourier suavizados se calcularon las funciones de transferencia definidas como los cocientes que resultan de dividir las ordenadas espectrales del sistema fijo entre las correspondientes al móvil, tal información también se incluye en las figuras 4.15 a 4.32.

SISMOMETRO (Kinematics)	No. SERIE	To	h	G	R
VERT	169	5.3	0.63	229	31000
N-S	244	5.0	0.69	193	16600
E-O	243	4.5	0.68	164	15340

Tabla 4.1 Características principales del sistema fijo de adquisición de datos en las ERA: CDAO, SCT, TLHB y TLHD.

SISMOMETRO (Kinematics)	No. SERIE	To	h	G	R
VERT	172	5.7	0.70	250	24000
N-S	245	5.2	0.70	202	18750
E-O	242	4.8	0.69	169	12480

Tabla 4.2 Características principales del sistema móvil de adquisición de datos en la ERA: SCT.

SISMOMETRO (Kinematics)	No. SERIE	To	h	G	R
VERT	116	5.7	0.68	304	39000
N-S	121	4.5	0.68	173	15750
E-O	240	4.5	0.65	183	12980

Tabla 4.3 Características principales del sistema móvil de adquisición de datos en las ERA: CDAO y TLHB.

SISMOMETRO (Kinematics)	No. SERIE	To	h	G	R
VERT	172	5.7	0.70	250	24000
N-S	121	4.5	0.68	173	15750
E-O	240	4.5	0.65	183	12980

Tabla 4.4 Características principales del sistema móvil de adquisición de datos en la ERA: TLHD.

REGISTRADOR	GANANCIAS	MUESTREO (Muestras/s)	VOLT. max.
Sprengnether DR-100	0, 6, 12, 18 24, 30, 36, 42 48, 54, 60	100	$\pm 15$
Resolución de 0.0024 Volts/cta			

Tabla 4.5 Características principales del registrador utilizado en los sistemas fijo y móvil.

To = Periodo natural en s  
h = Factor de amortiguamiento  
G = Constante del motor, en volts X s/m  
R = Resistencia de derivación, en  $\Omega$  dentro del sismómetro.

Estación	Sitio	Segundo inicial de la ventana	Ancho de la ventana en segundos
CDAO	001	0.0	32.0
	002	5.0	40.5
	003	5.0	40.5
	004	5.0	40.5
SCI	001	74.0	20.0
	002	43.0	20.0
	003	11.0	19.0
	004	60.0	20.0
	005	38.0	20.0
	006	23.0	20.0
	007	12.0	15.0
	008	133.0	20.0
TLHB	001	20.0	40.5
	002	0.0	40.5
	003	0.0	40.5
	004	50.0	40.5
	005	55.0	40.5
	006	9.5	40.5
	007	10.0	40.5
TLHD	004	85.0	40.5
	005	18.0	40.5
	006	31.0	40.5

Tabla 4.6. Selección de ventanas de los registros obtenidos.

# FUNCION DE TRANSFERENCIA

(Aceleración)

Función entrada al sistema:

VILT880208AT.T

Función salida del sistema:

VILC880208AT.T

Incremento en frecuencia:

0.0244

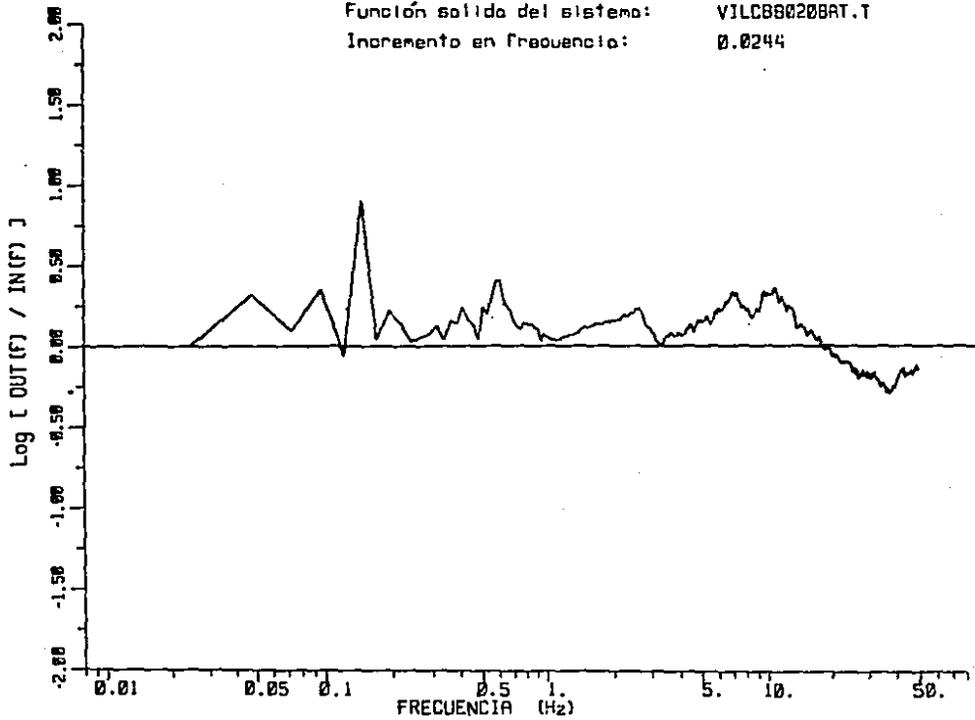
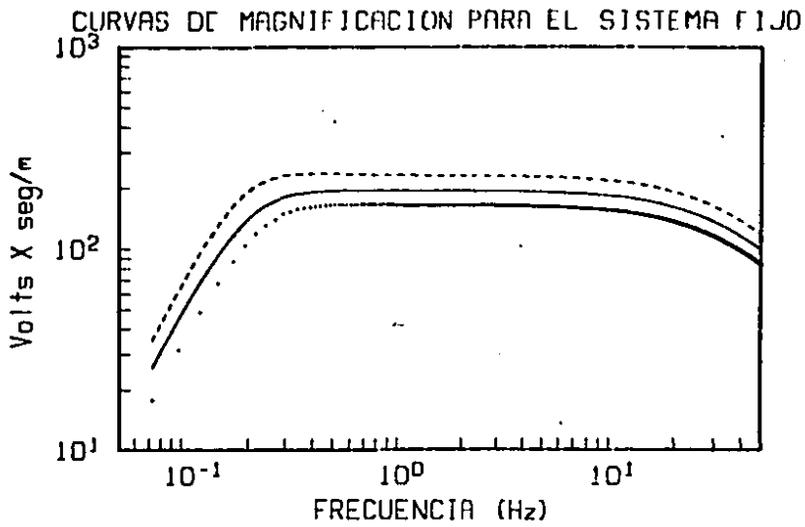
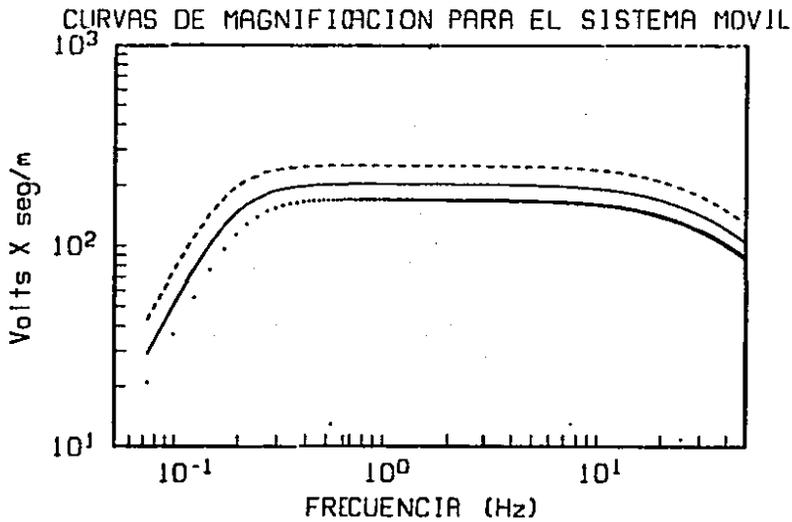


Fig 4.1 Función de Transferencia entre las estaciones acelerográficas VILC y VILT (Presa la Villita).



(a)



(b)

Fig 4.2 Curvas de magnificación, componente vertical (---), horizontal 1 (—) y horizontal 2 (...).  
 a) Sistema fijo  
 b) Sistema móvil

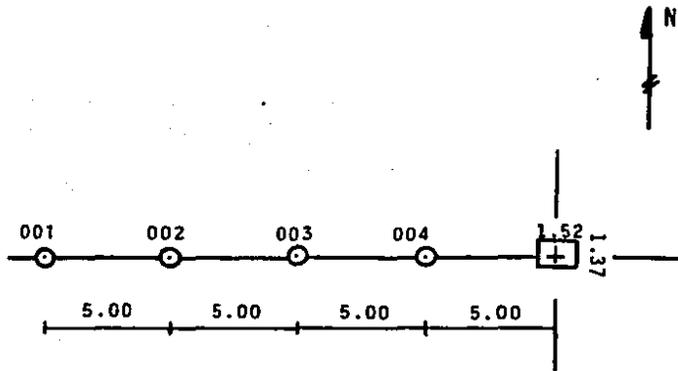


Fig 4.3 Localización de los sitios de medición en la estación acelerográfica CDAO.

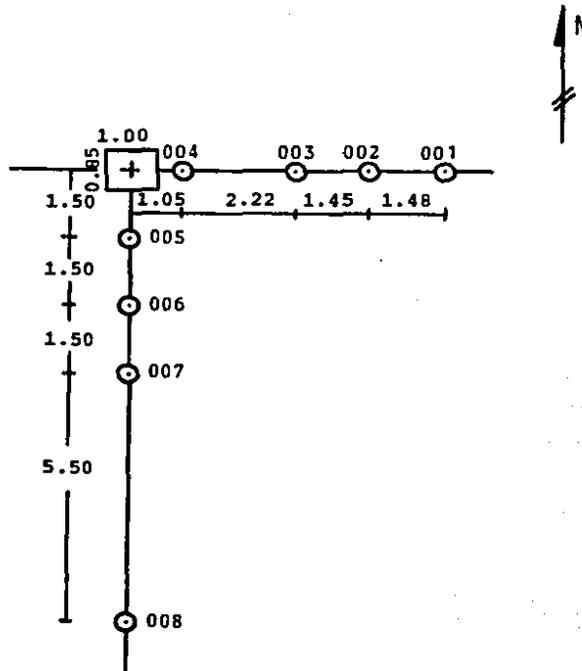


Fig 4.4 Localización de los sitios de medición en la estación acelerográfica SCT.

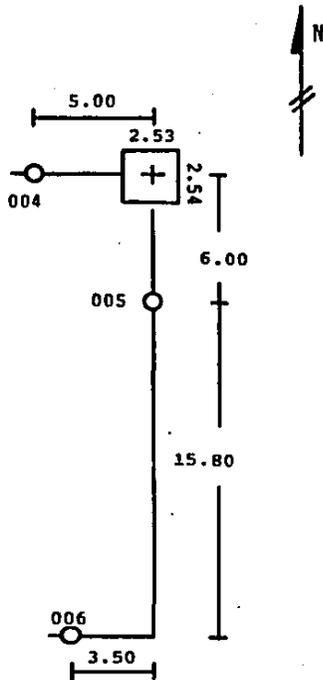


Fig 4.5 Localización de los sitios de medición en la estación acelerográfica TLHD.

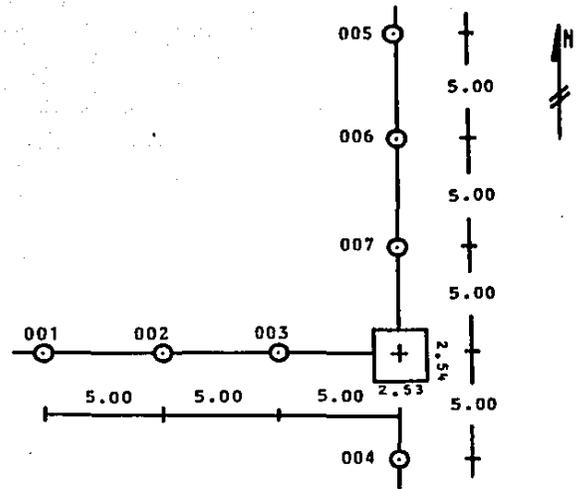
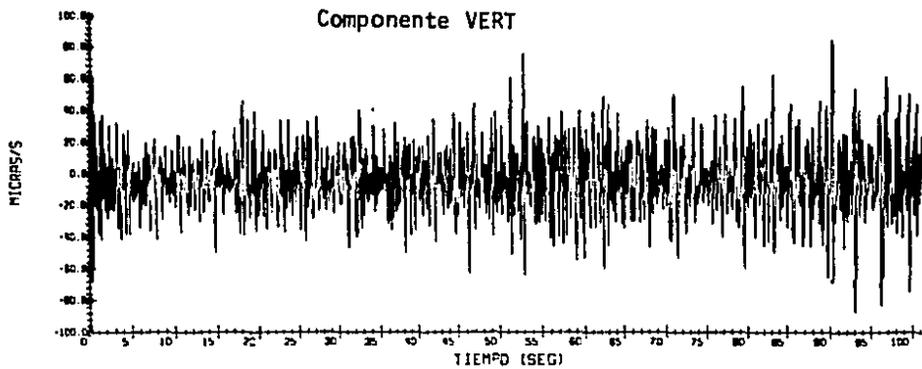
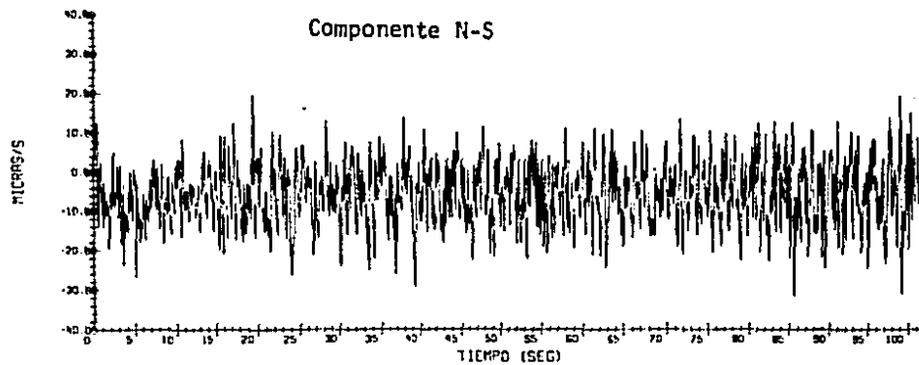


Fig 4.6 Localización de los sitios de medición en la estación acelerográfica TLHB.

1E7004



1E7004



1E7004

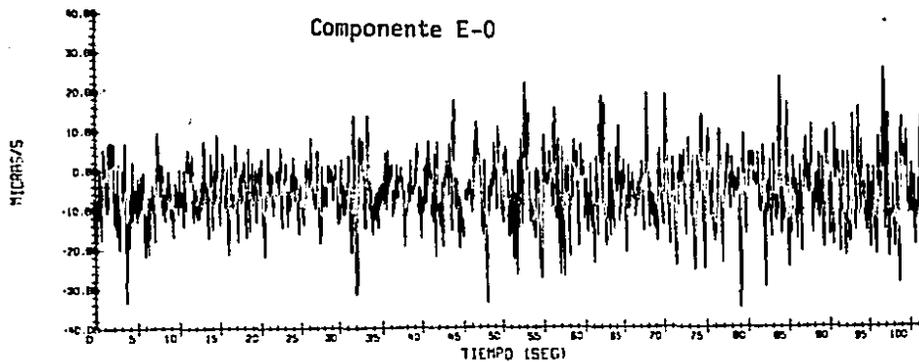
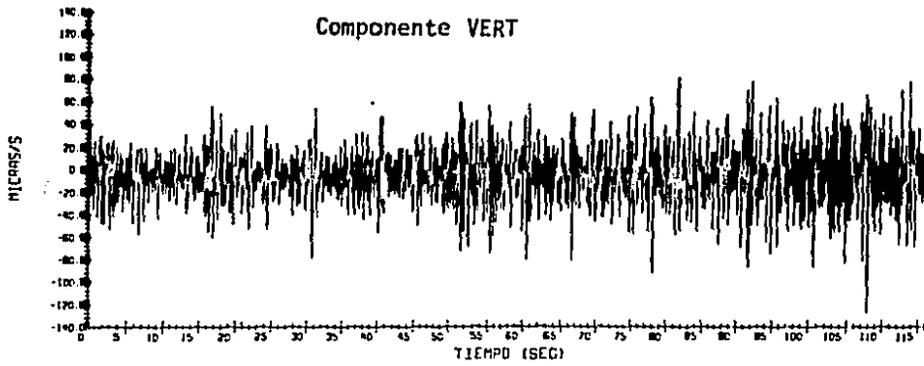
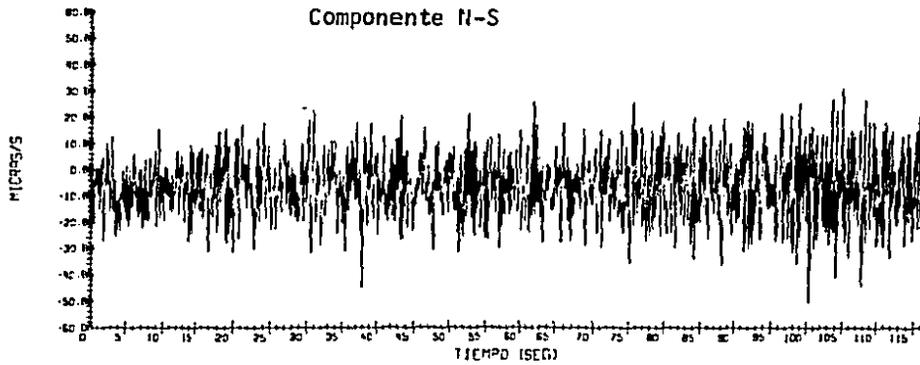


Fig 4.7 Registro obtenido en la estación acelerográfica CDAO en el sitio 004 (Sistema fijo).

1M7004



1M7004



1M7004

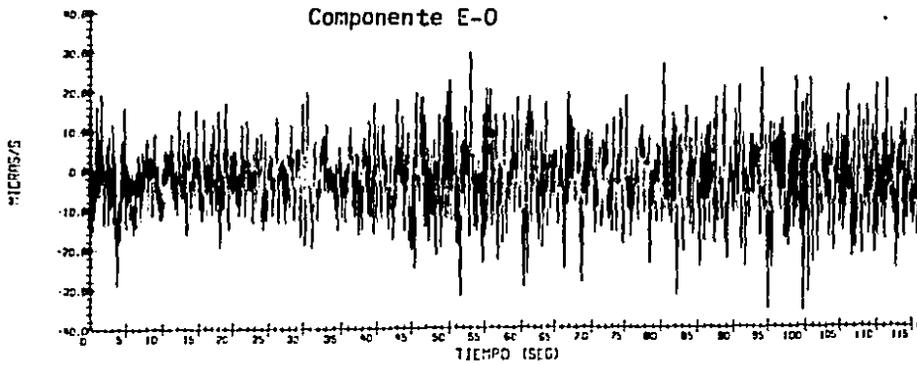
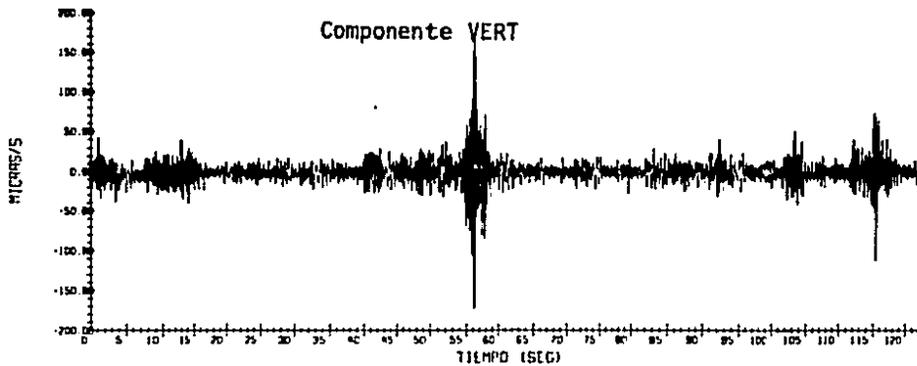
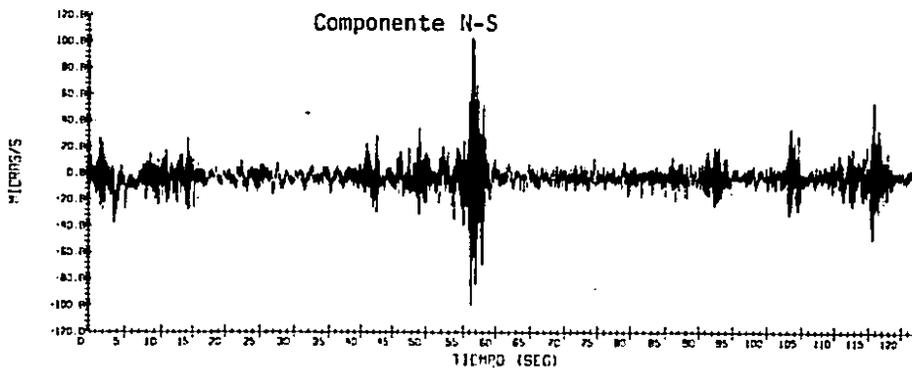


Fig 4.8 Registro obtenido en la estación acelerográfica CDAO en el sitio 004 (Sistema móvil).

1E7004



1E7004



1E7004

Canal 3

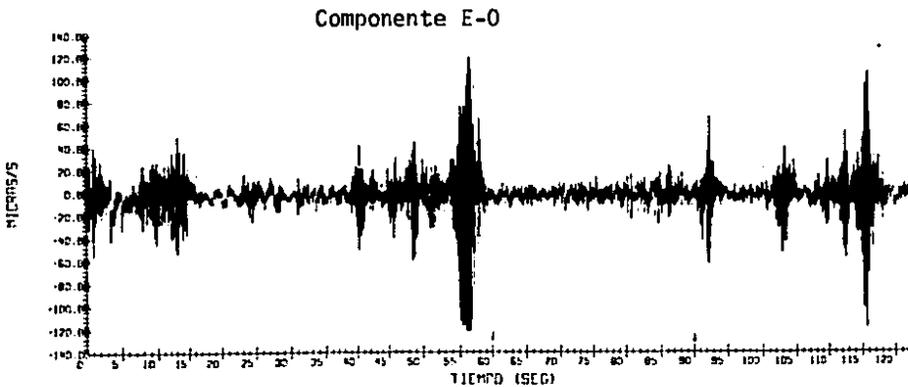
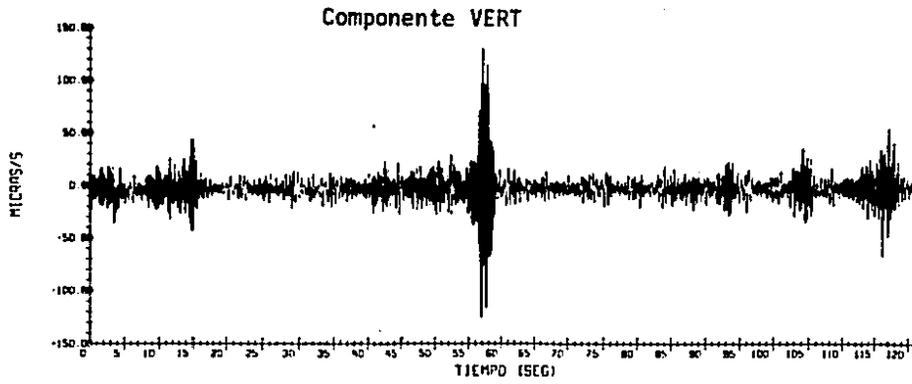
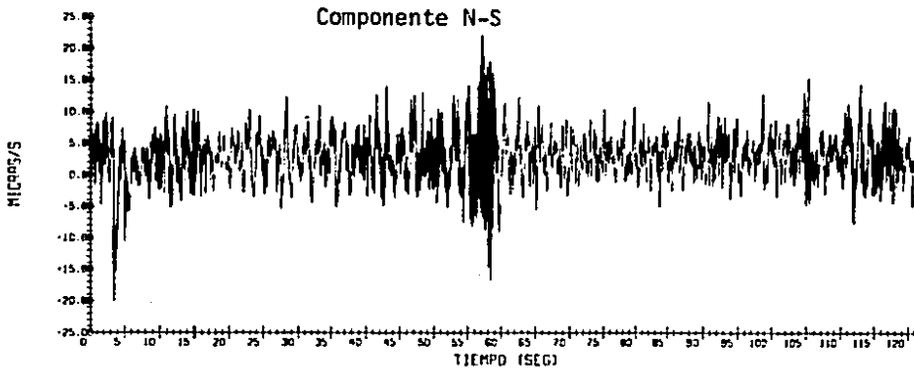


Fig 4.9 Registro obtenido en la estación acelerográfica SCT en el sitio 004 (Sistema fijo).

IM7004



IM7004  
Línea 2



IM7004  
Línea 3

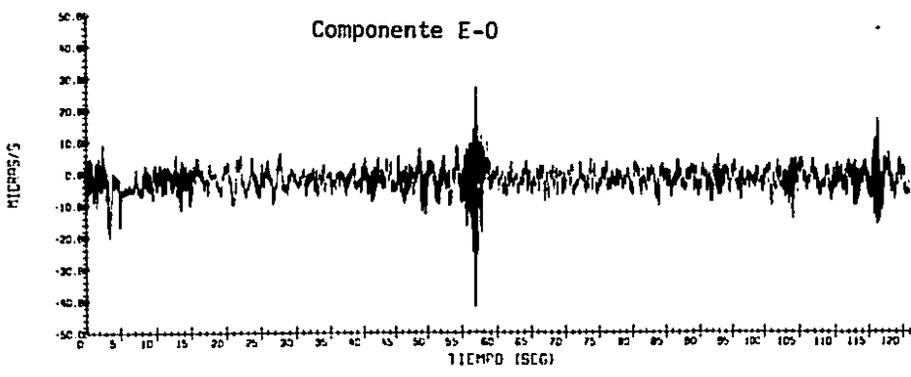
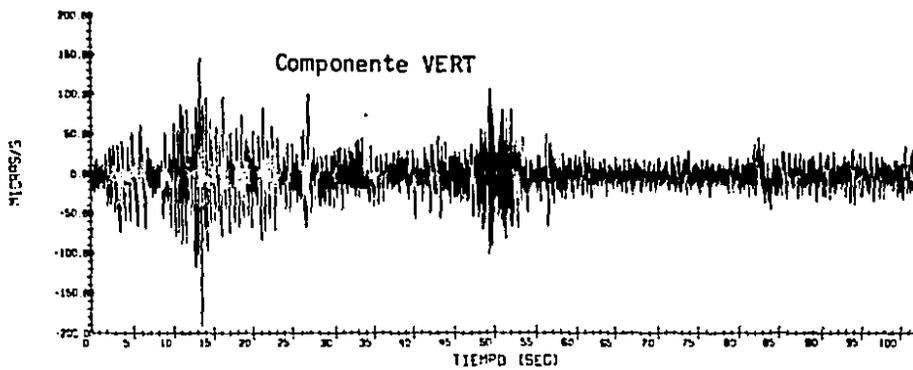
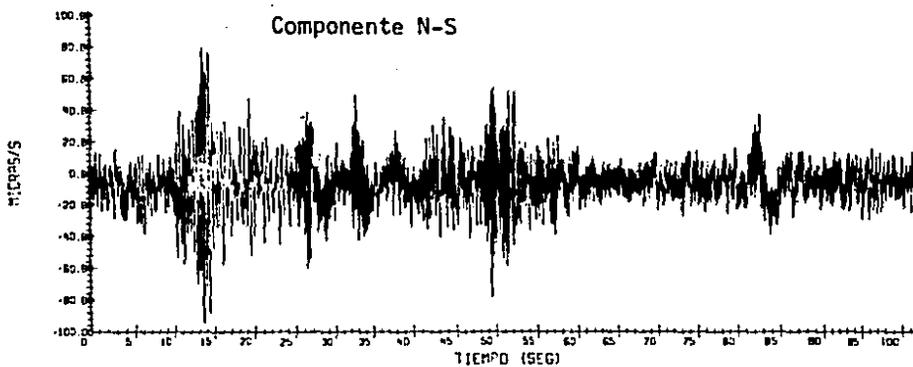


Fig 4.10 Registro obtenido en la estación acelerográfica SCT en el sitio 004 (Sistema móvil).



IE7005



IE7005

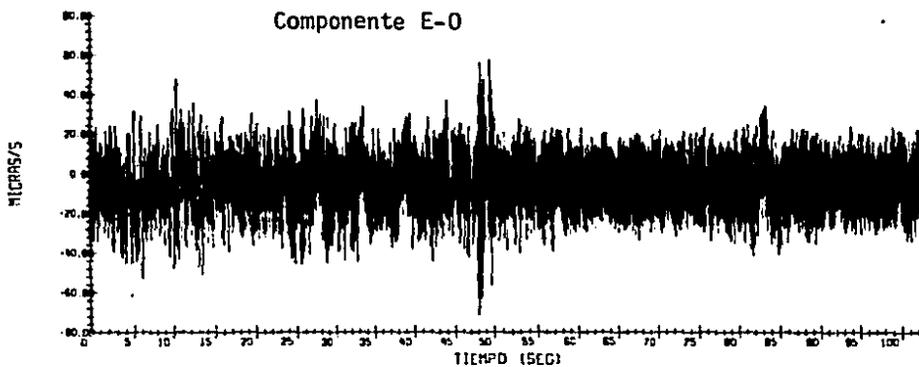
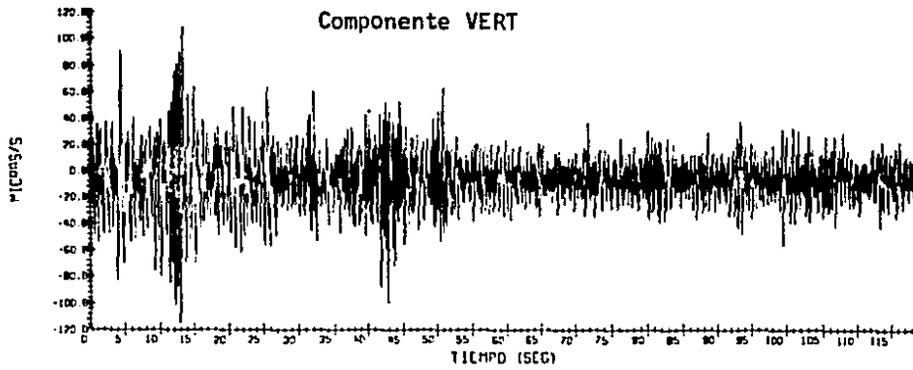
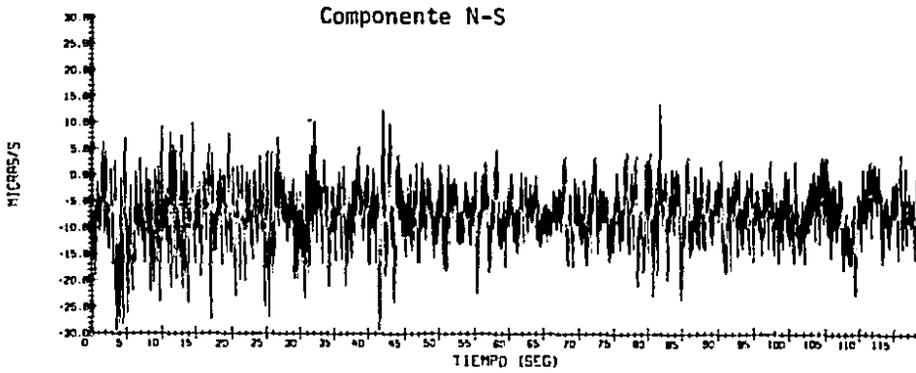


Fig 4.11 Registro obtenido en la estación acelerográfica TLHB en el sitio 005 (Sistema fijo).

1M7005



1M7005



1M7005

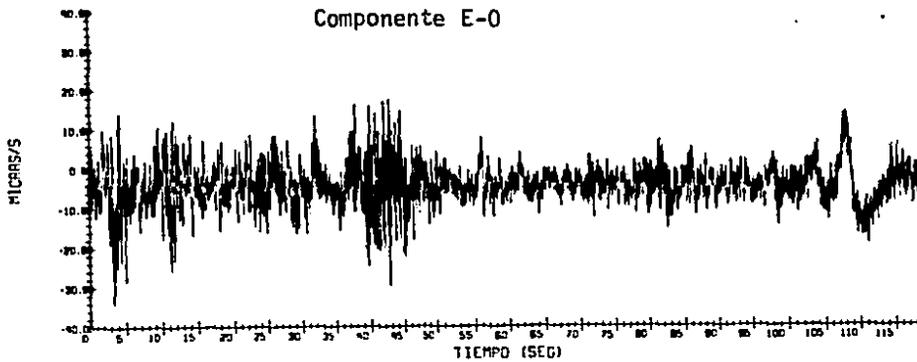


Fig 4.12 Registro obtenido en la estación acelerográfica TLHB en el sitio 005 (Sistema móvil).

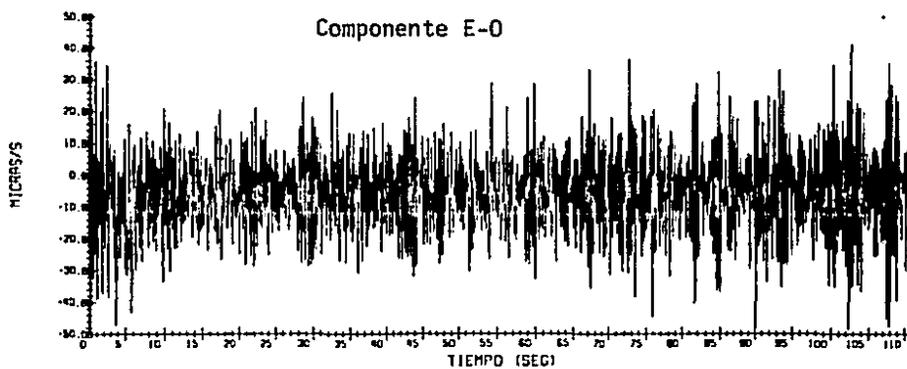
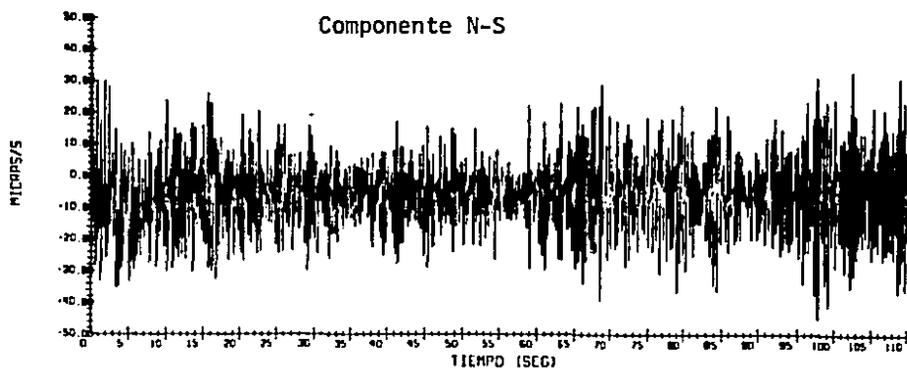
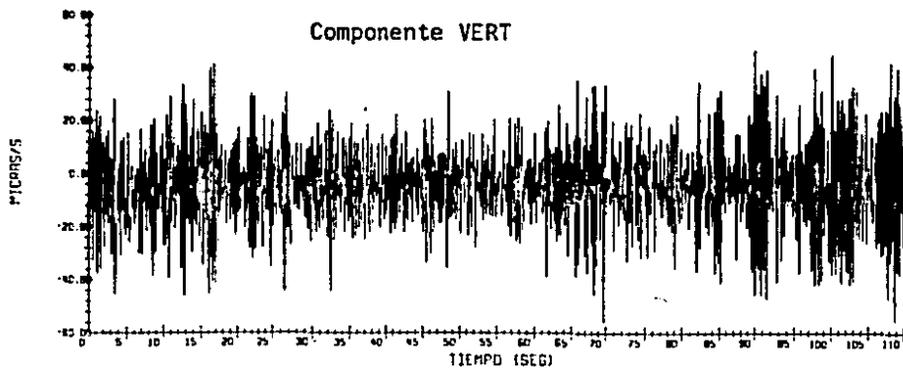
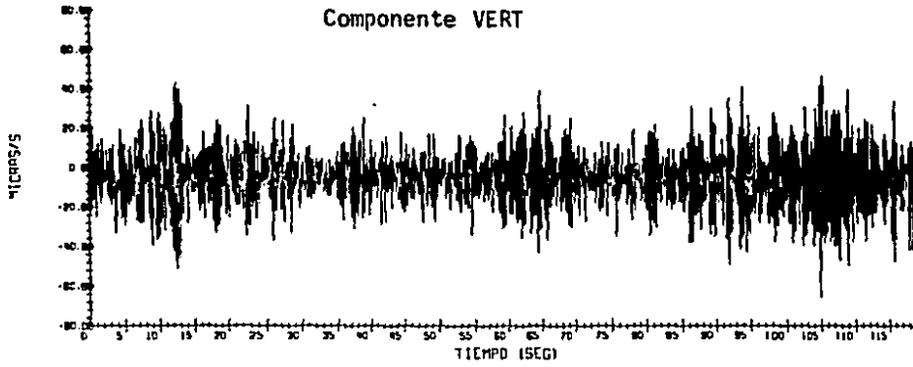
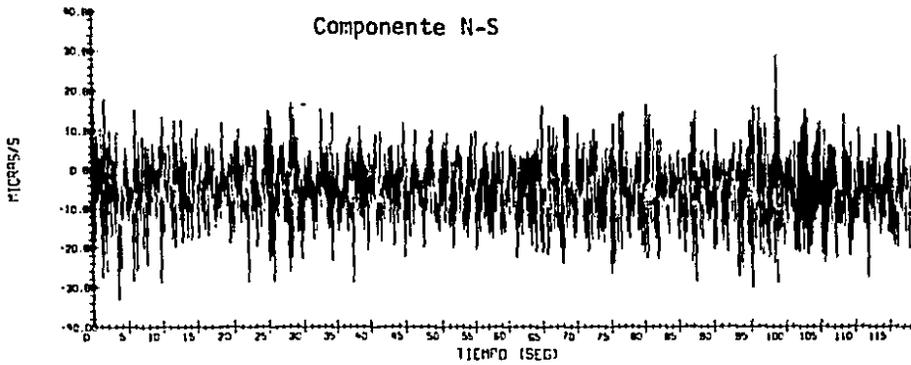


Fig 4.13 Registro obtenido en la estación acelerográfica TLHD en el sitio 005 (Sistema fijo).

1M7005



1M7005



1M7005

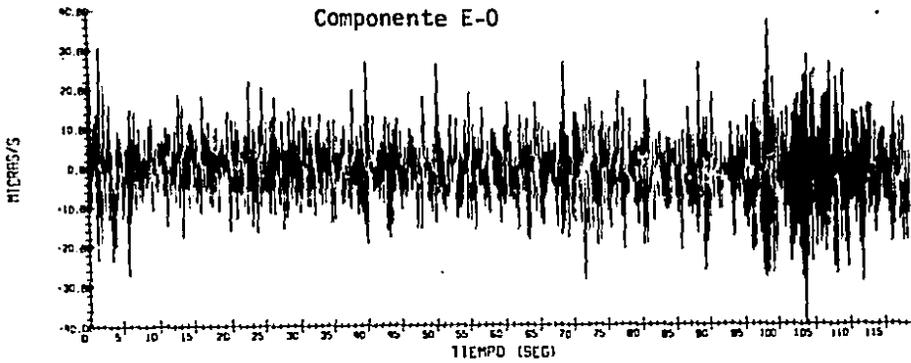
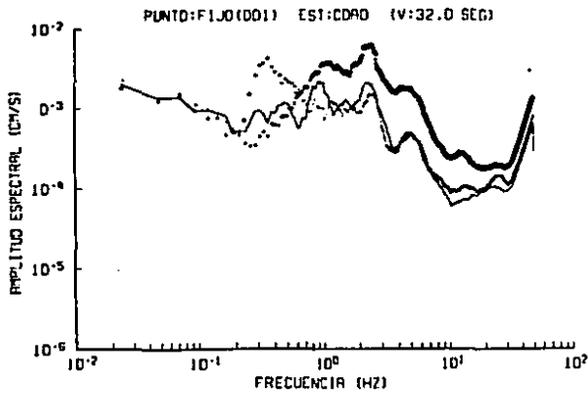
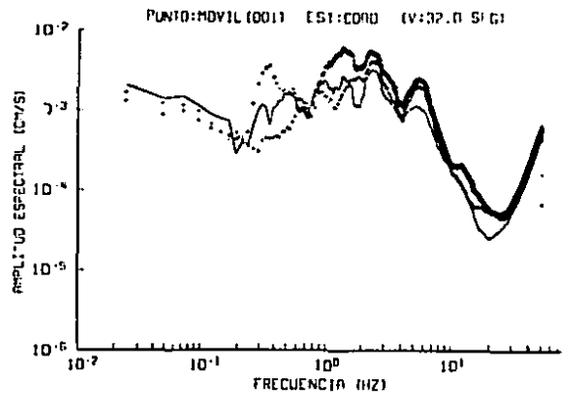


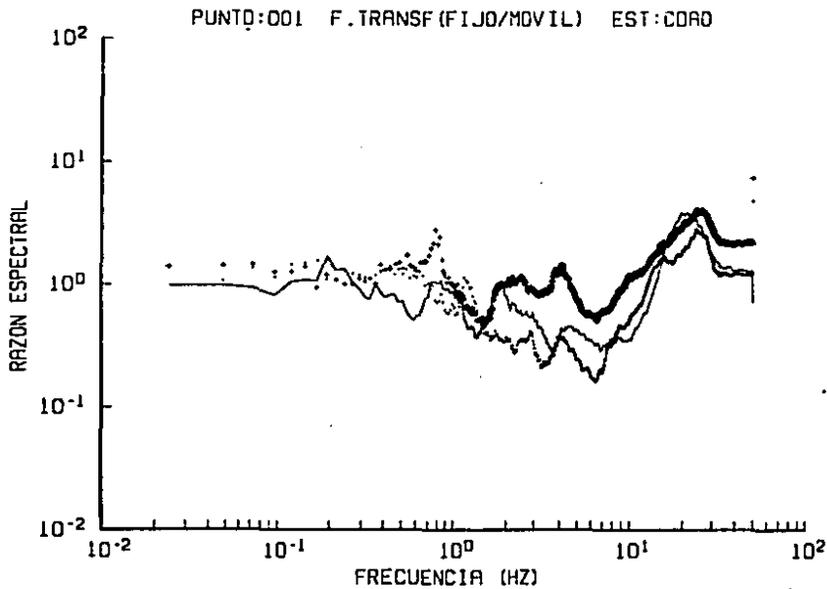
Fig 4.14 Registro obtenido en la estación acelerográfica TLHD en el sitio 005 (Sistema móvil).



(a)



(b)



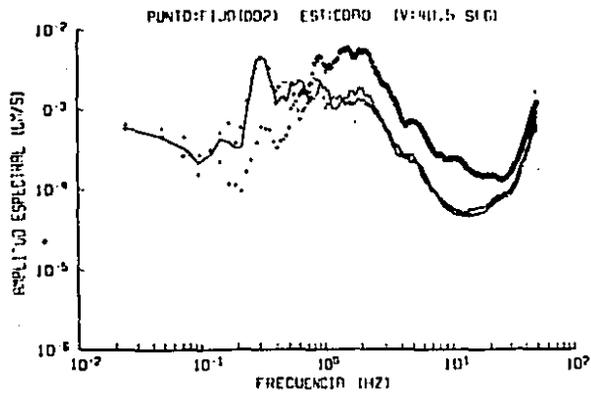
(c)

Fig 4.15 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA CDAO, componentes NS(—), EO(...) y VERT(+++).

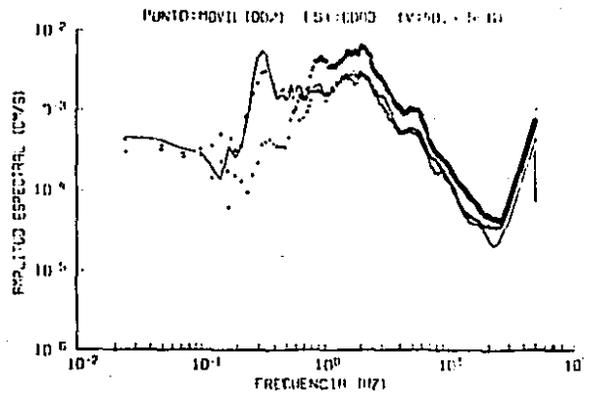
a) Espectros de Fourier para la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 001

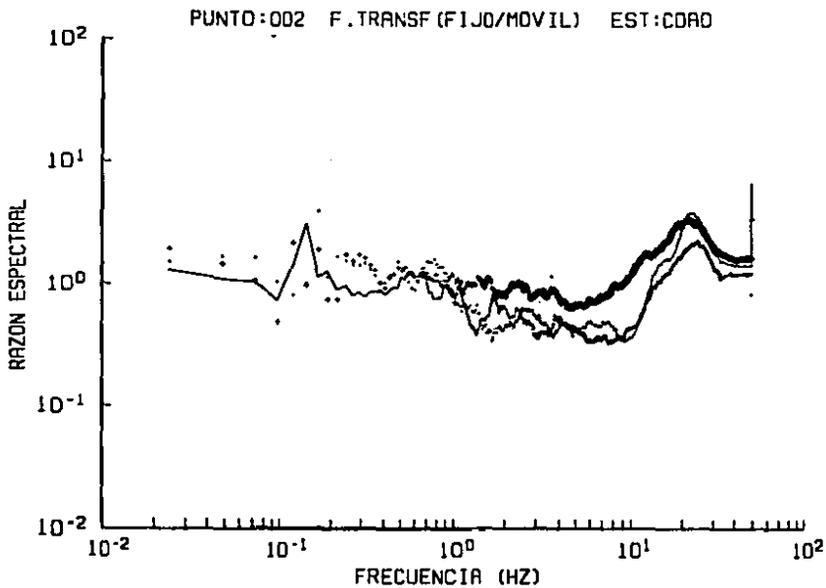
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 001



(a)



(b)



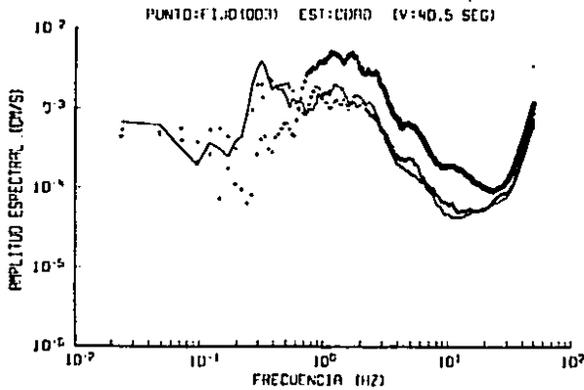
(c)

Fig 4.16 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA CDAO, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

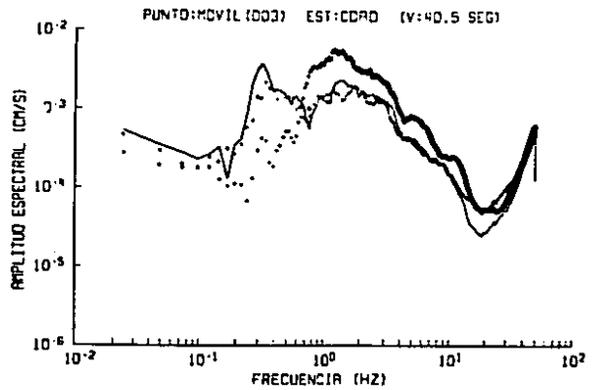
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 002

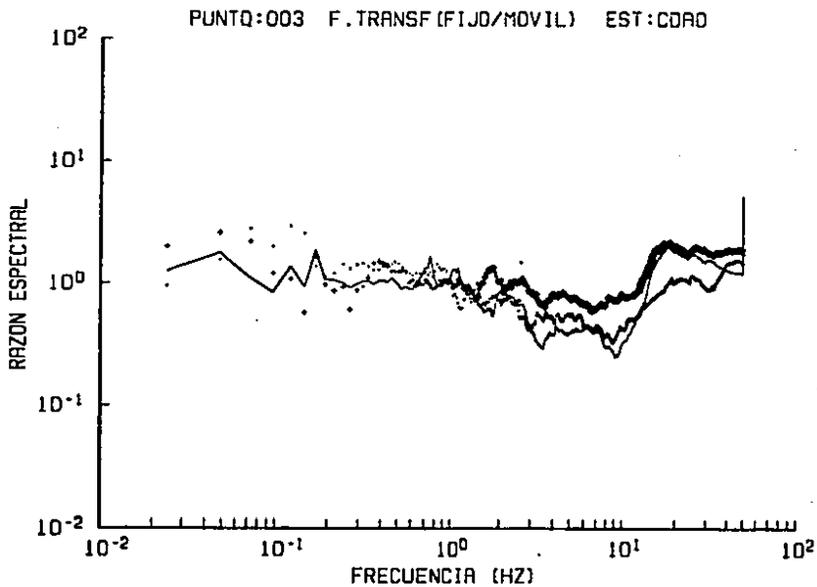
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 002



(a)



(b)



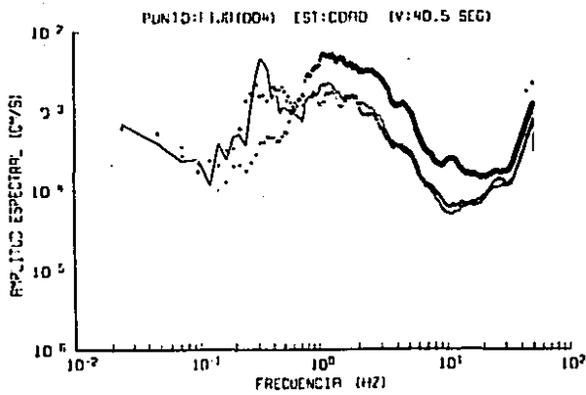
(c)

Fig 4.17 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA CDAO, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

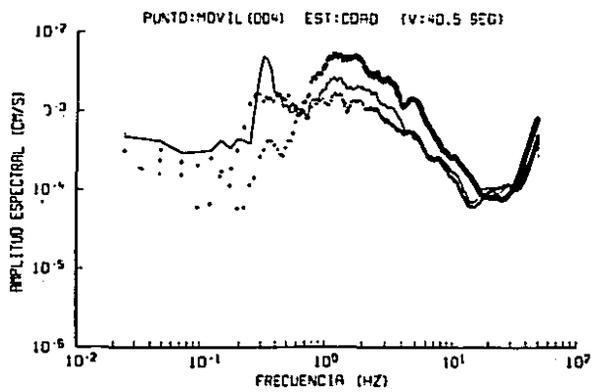
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 003

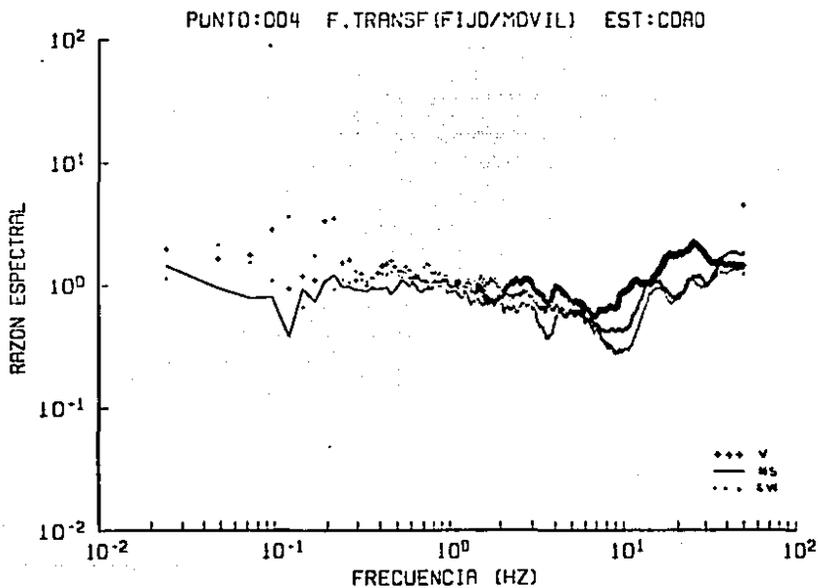
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 003



(a)



(b)



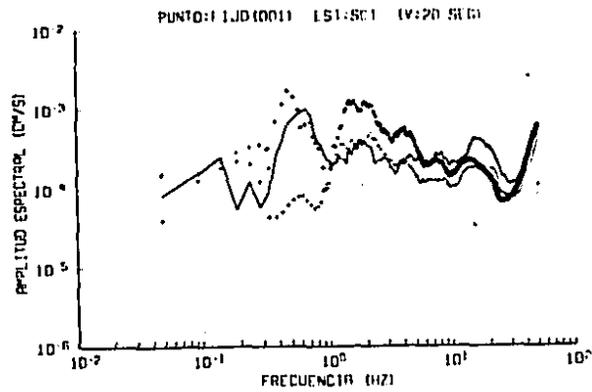
(c)

Fig 4.10 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA CDAO, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

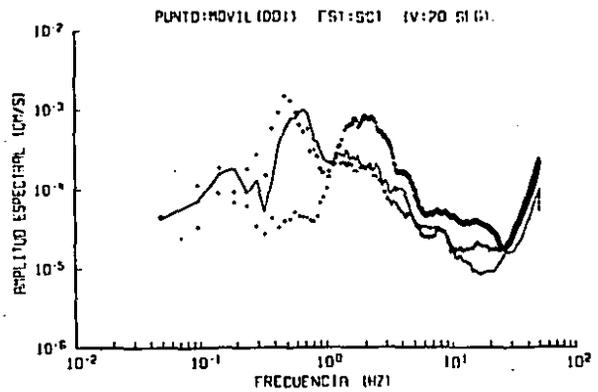
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 004

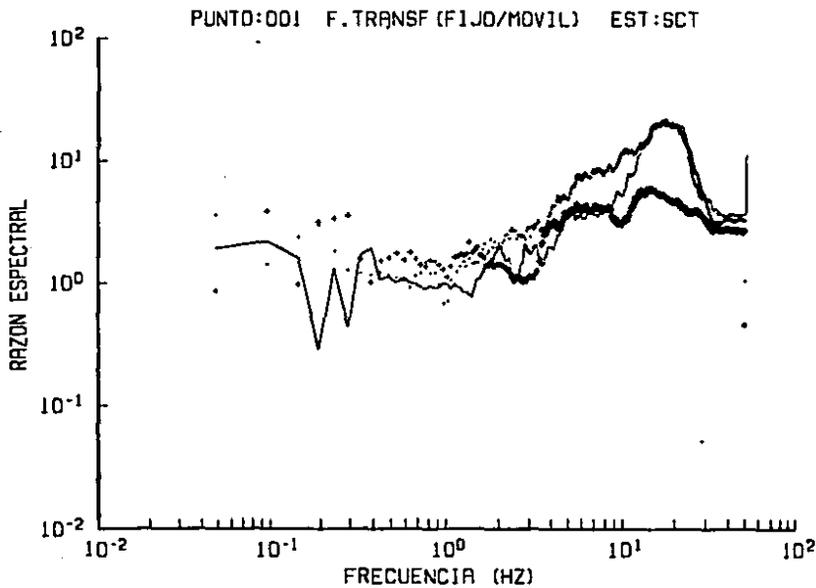
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 004



(a)



(b)



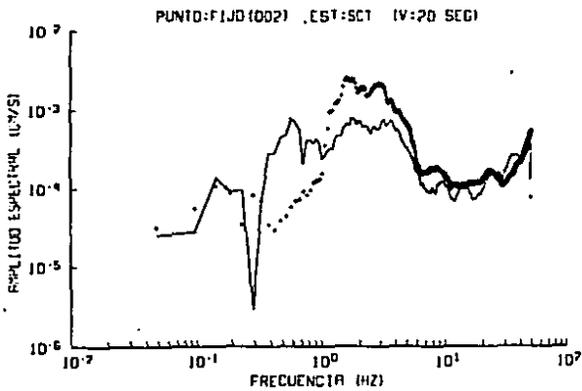
(c)

Fig 4.19 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA SCT, componentes NS(—), E0(....) y VERT(+++).

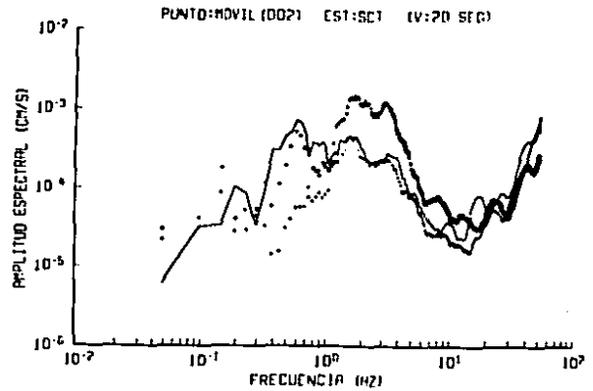
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 001

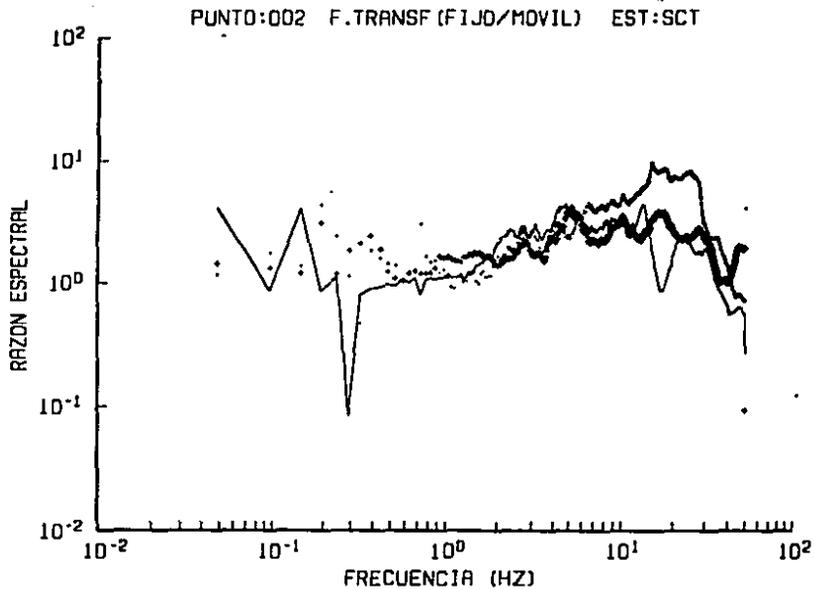
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 001



(a)



(b)



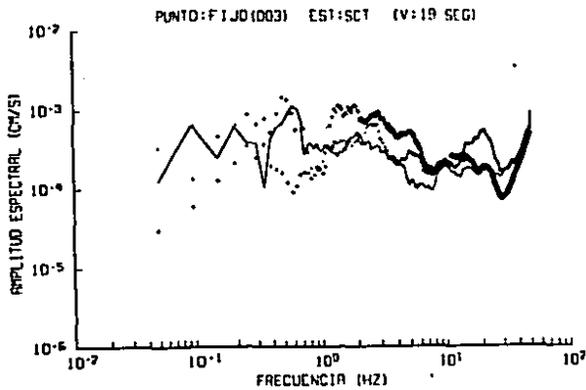
(c)

Fig 4.20 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA SCT, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

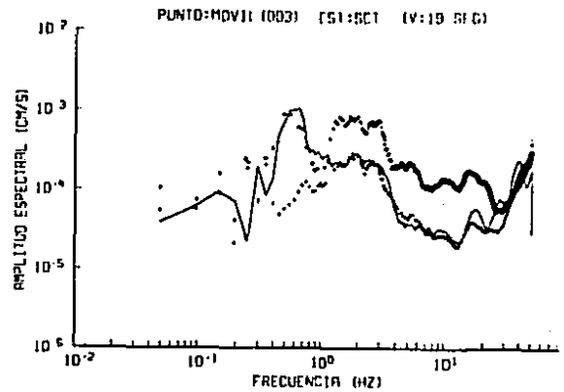
a) Espectros de Fourier para la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 002

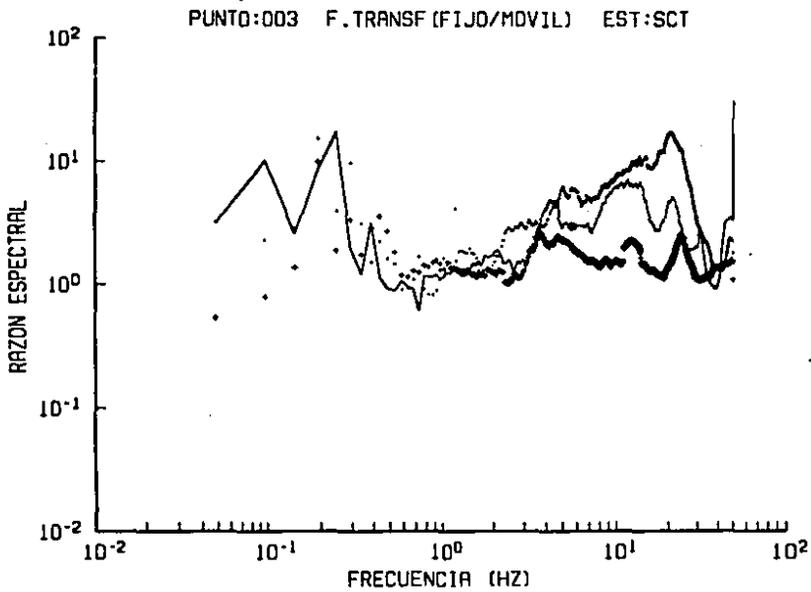
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 002



(a)



(b)



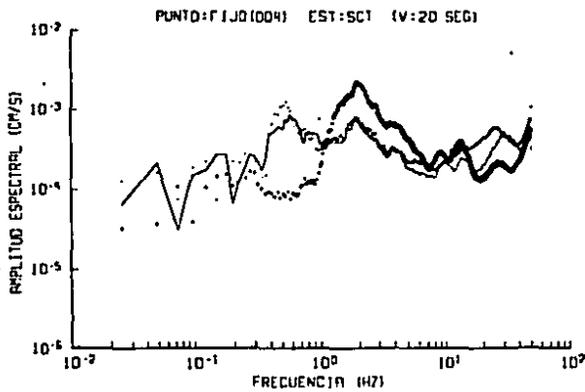
(c)

Fig 4.21 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA SCT, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

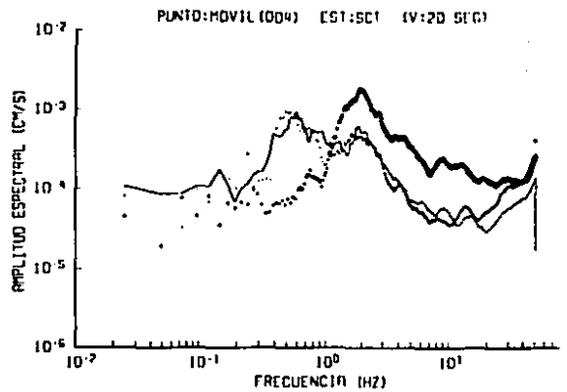
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 003

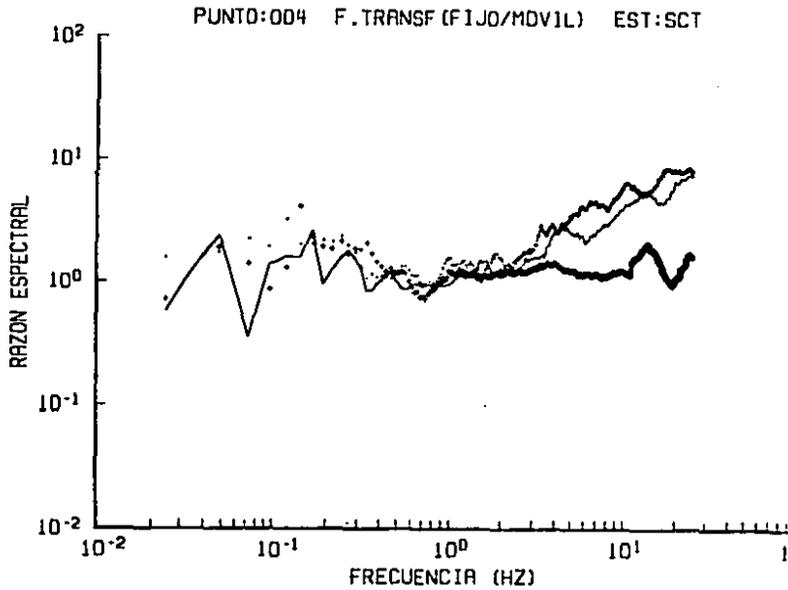
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 003



(a)



(b)



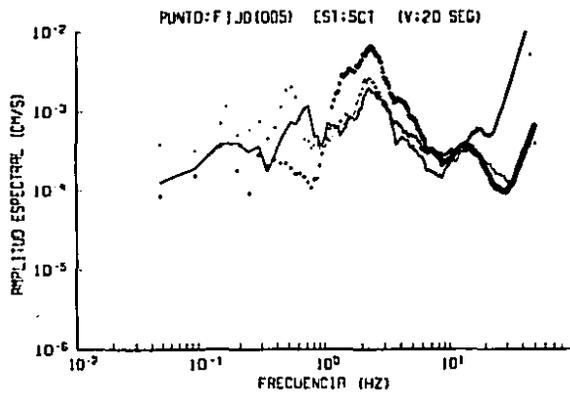
(c)

Fig 4.22 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA SCT, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

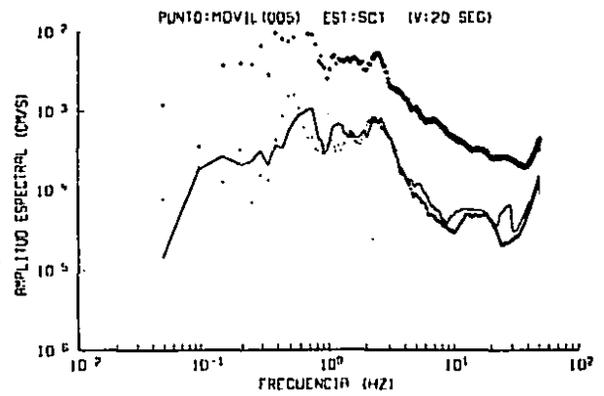
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 004

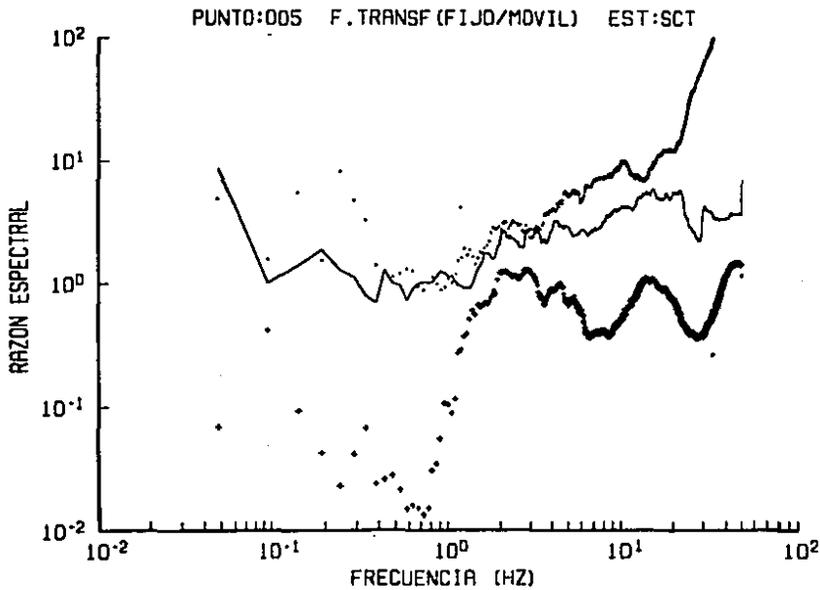
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 004



(a)



(b)



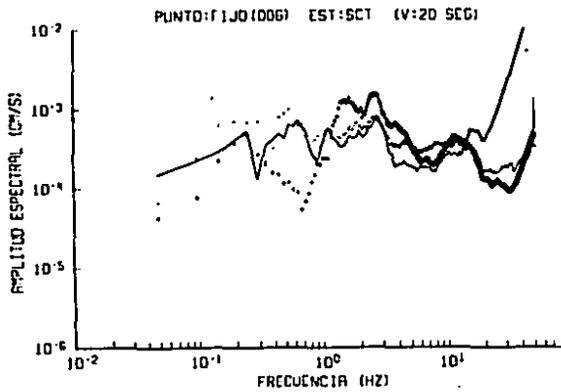
(c)

Fig 4.23 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA SCT, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

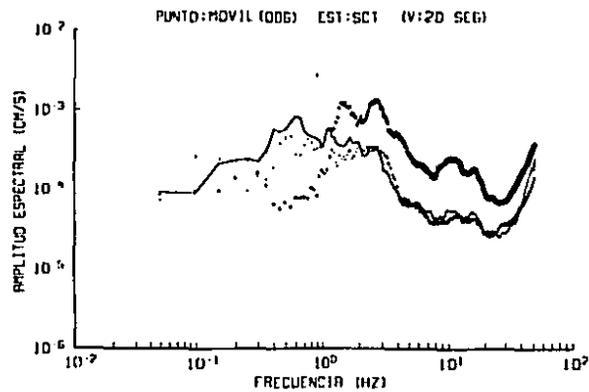
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 005

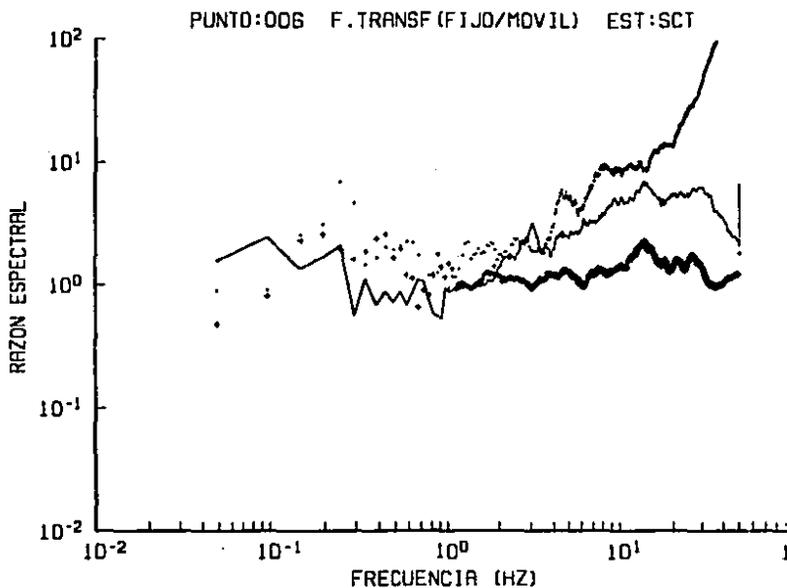
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 005



(a)



(b)



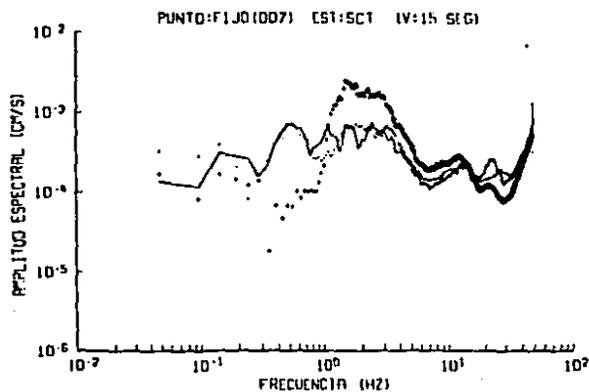
(c)

Fig 4.24 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA SCT, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

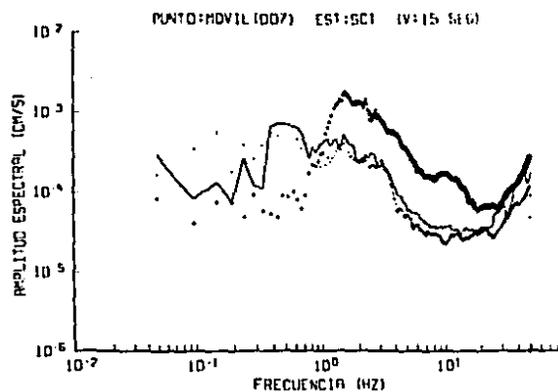
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 006

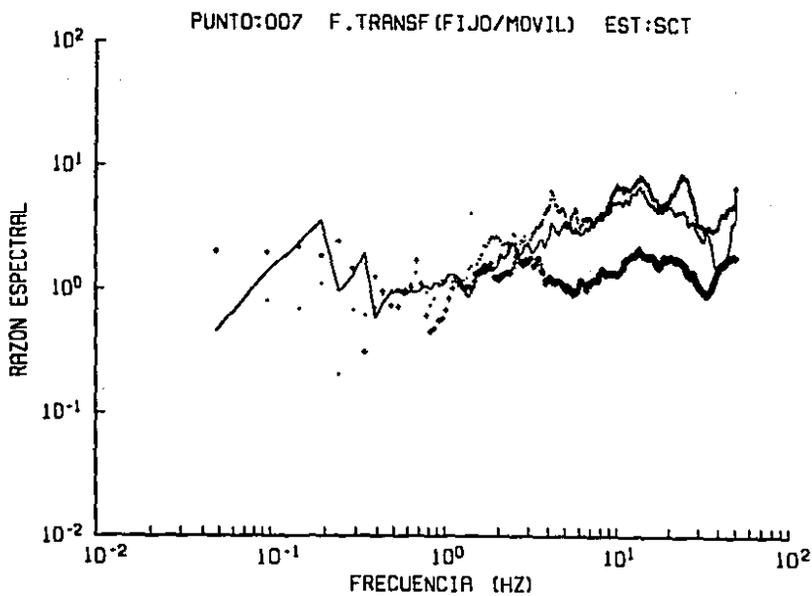
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 006



(a)



(b)



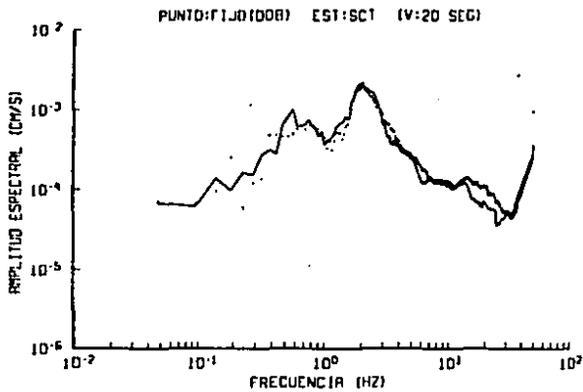
(c)

Fig 4.25 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA SCT, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

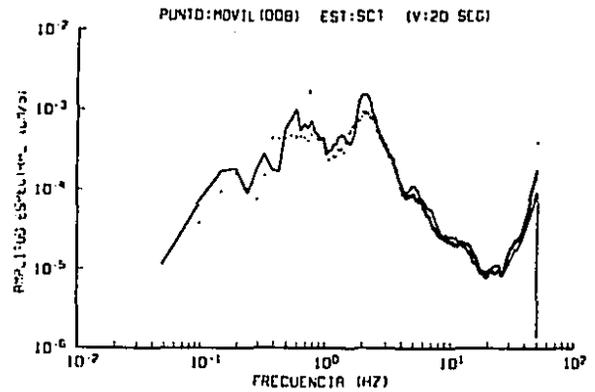
a) Espectros de Fourier para la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 007

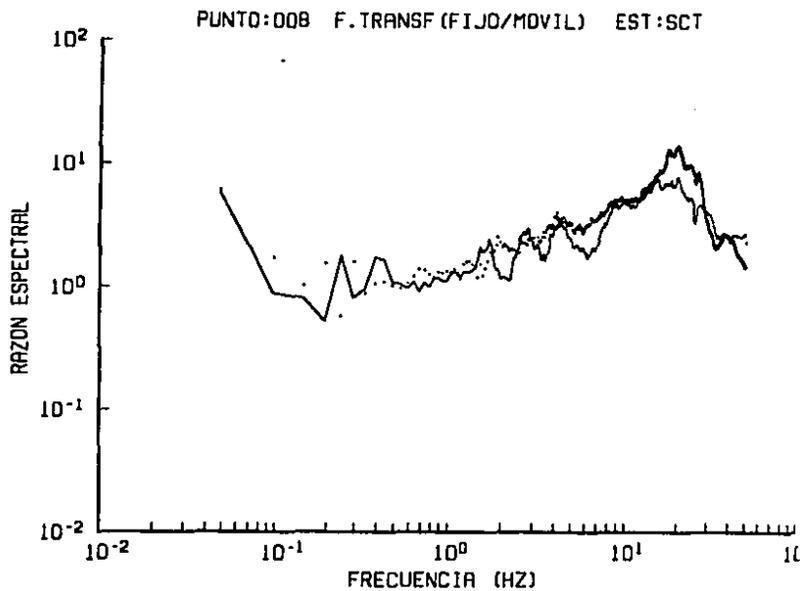
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 007



(a)



(b)



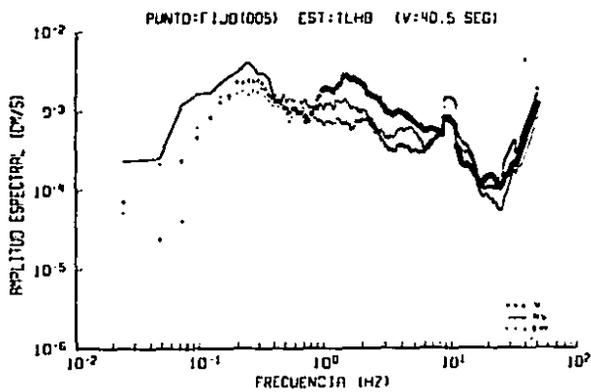
(c)

Fig 4.26 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA SCT, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

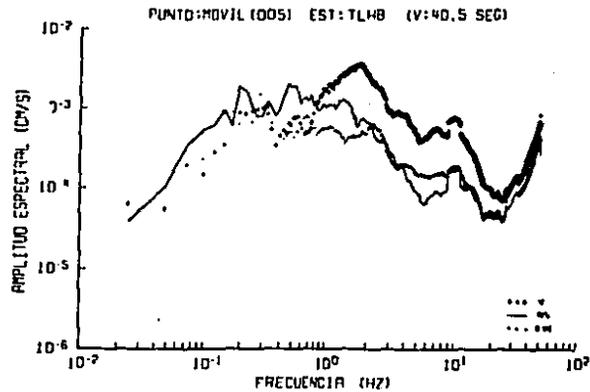
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 008

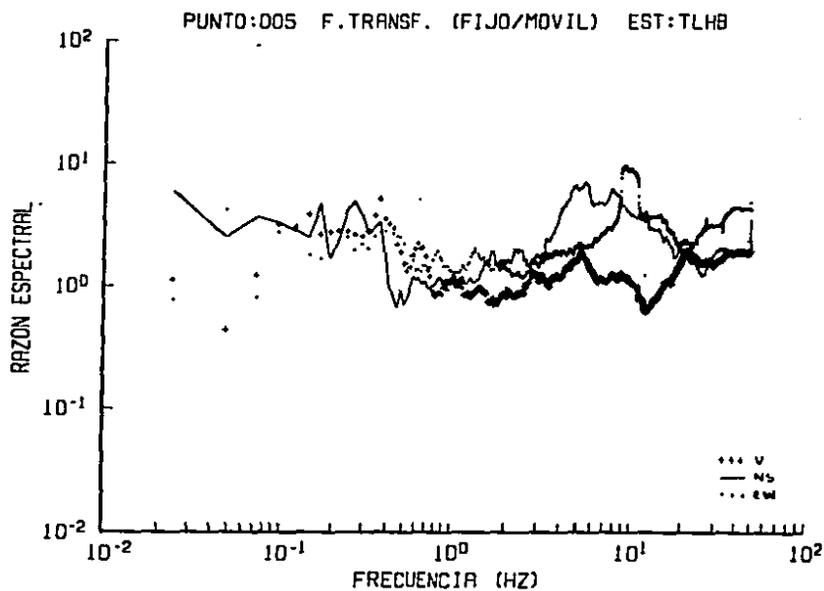
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 008



(a)



(b)



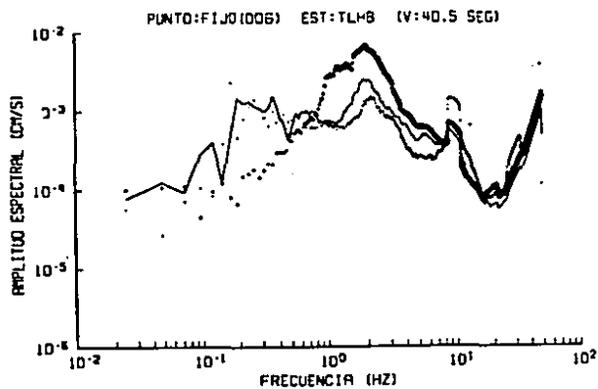
(c)

Fig 4.27 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA TLHB, componentes NS(—), E0(....) y VERT(+++).

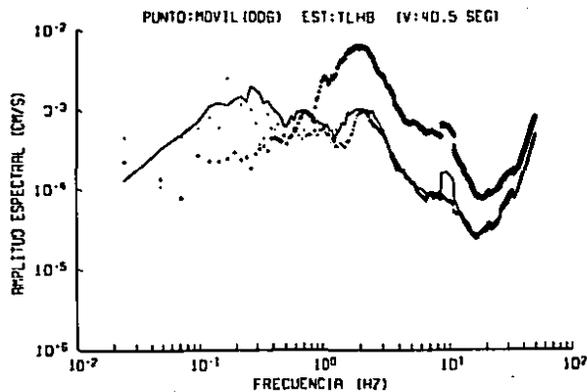
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 005

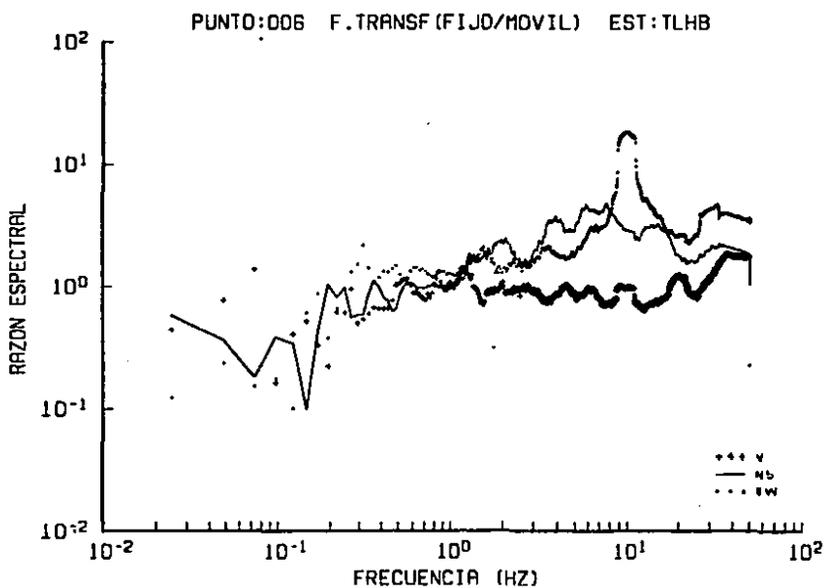
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 005



(a)



(b)



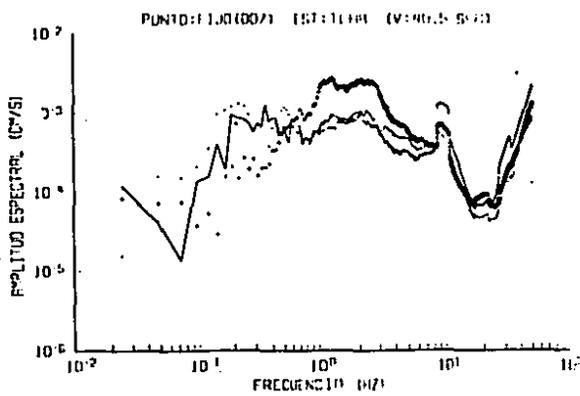
(c)

Fig 4.28 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA TLHB, componentes NS(—), EO(...) y VERT(+++).

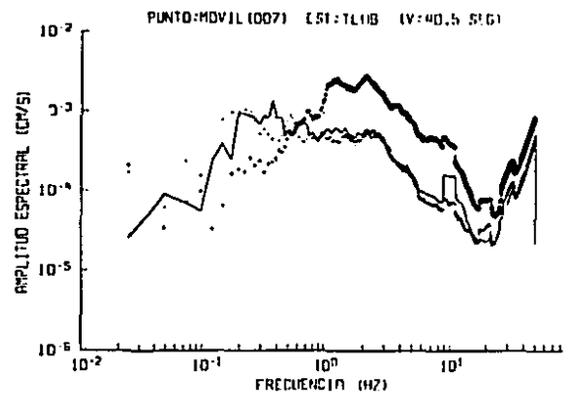
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 006

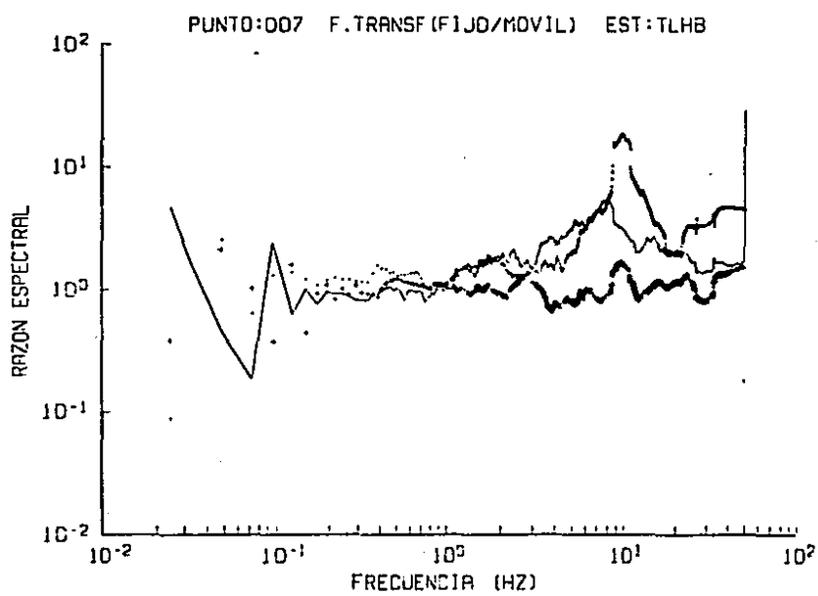
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 006



(a)

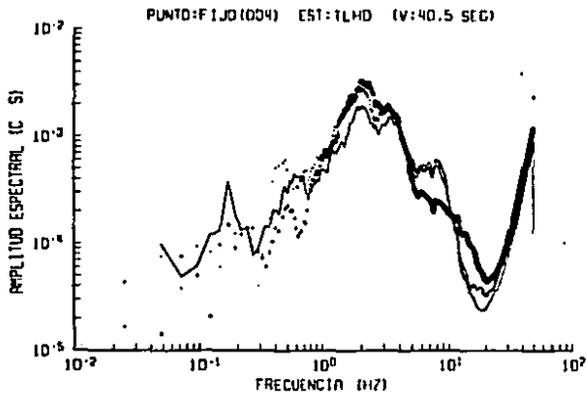


(b)

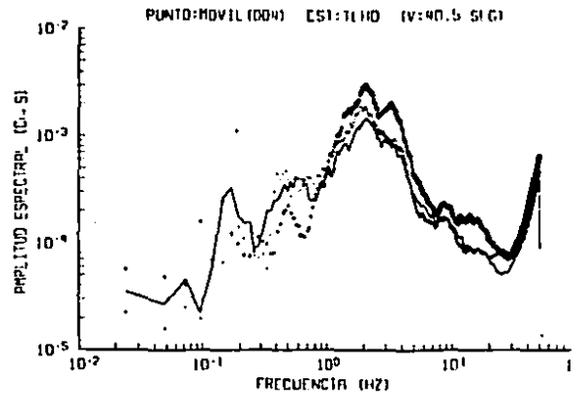


(c)

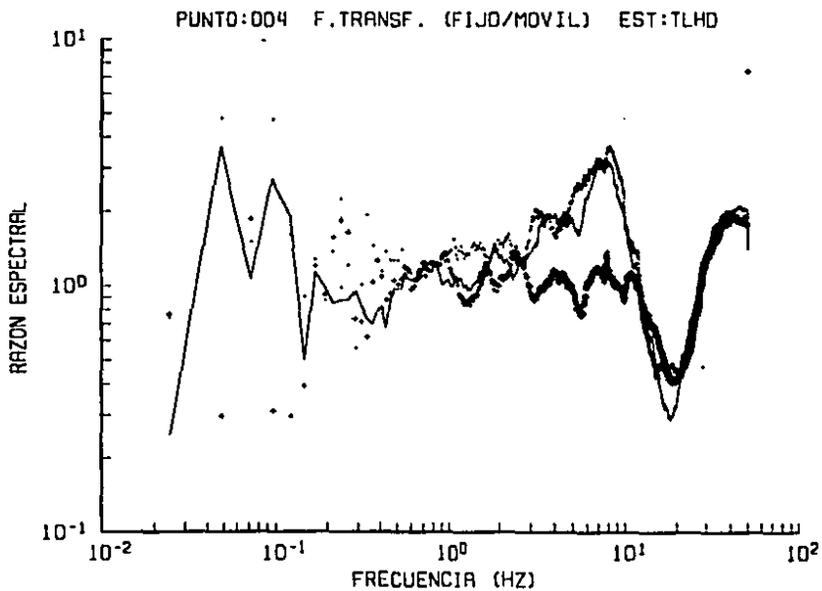
Fig 4.29 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA TLHB, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).  
 a) Espectros de Fourier en la base  
 b) Espectros de Fourier para el sitio 007  
 c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 007



(a)



(b)



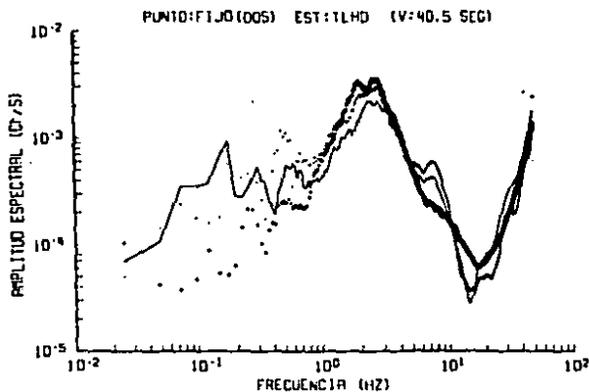
(c)

Fig 4.30 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA TLHD, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

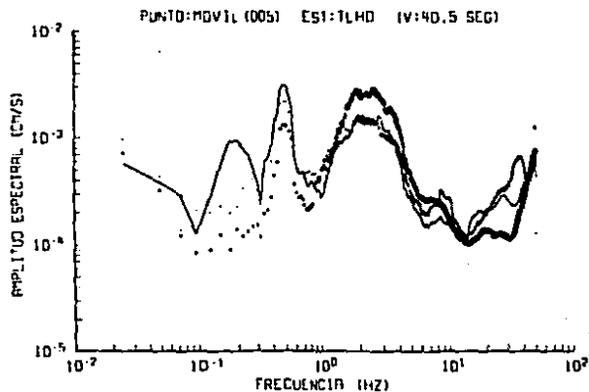
a) Espectros de Fourier para la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 004

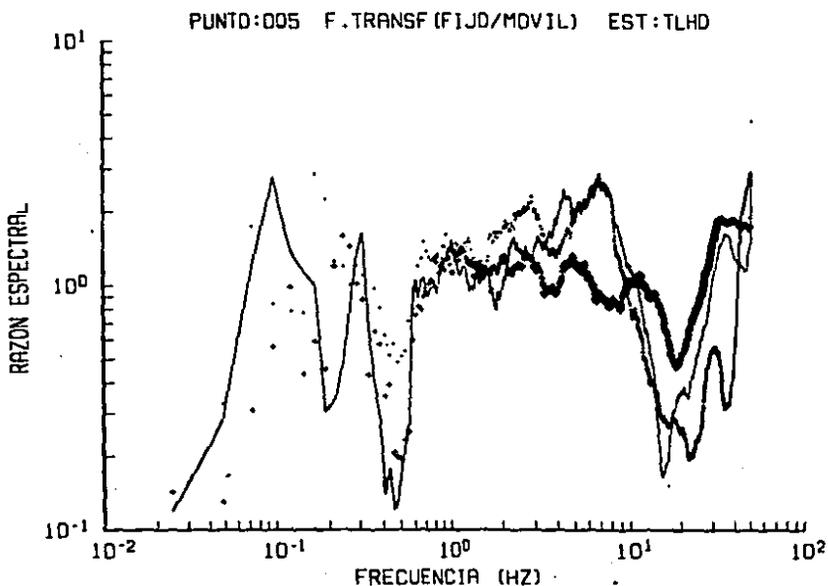
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 004



(a)



(b)



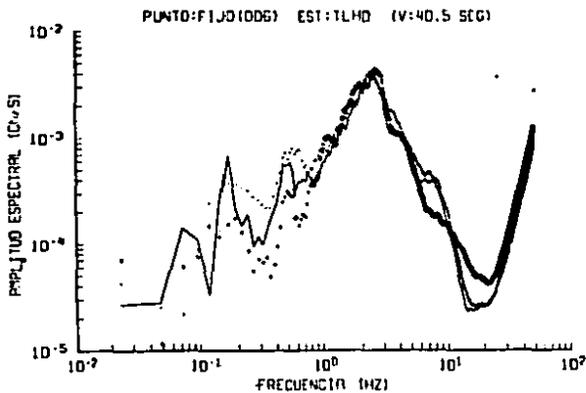
(c)

Fig 4.31 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA TLHD, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

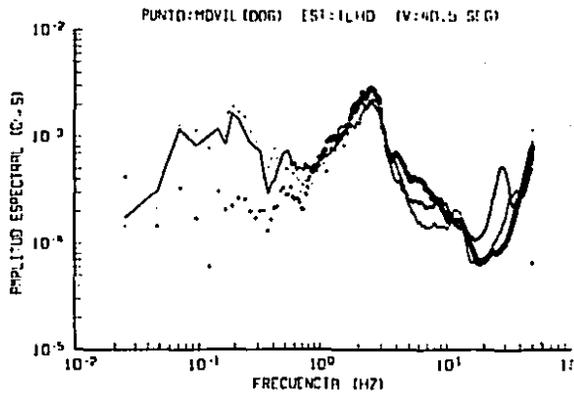
a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 005

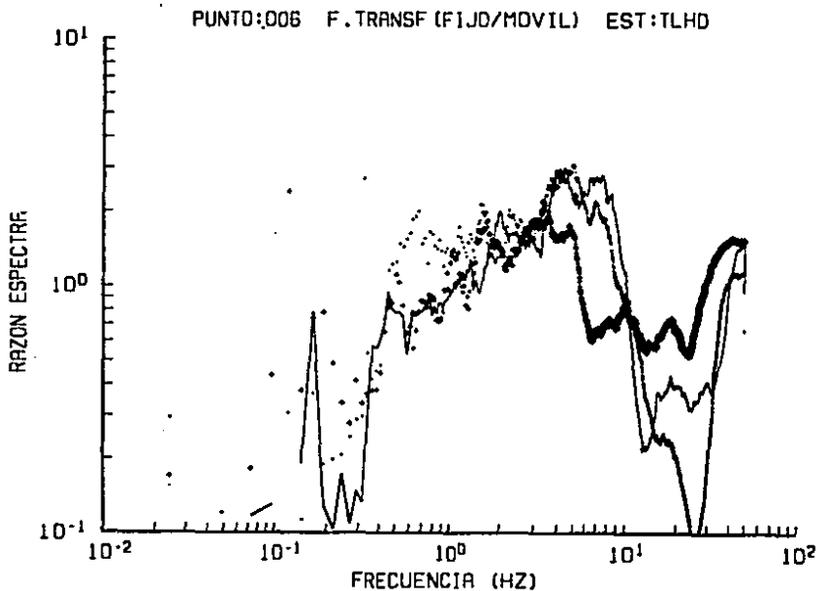
c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 005



(a)



(b)



(c)

Fig 4.32 Espectros de Fourier de velocidad y Función de Transferencia en la ERA TLHD, componentes NS(—), EO(....) y VERT(+++).

a) Espectros de Fourier en la base

b) Espectros de Fourier para el sitio 006

c) Función de Transferencia correspondiente al sitio 006

## 5. ESTUDIO TEORICO SOBRE LOS EFECTOS DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA EN LA ESTACION DE REGISTRO DE ACELERACION SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

En este capitulo se hace la descripción del modelo teórico considerado y la forma en que se aplicó para estudiar los efectos de interacción suelo-estructura en la estación de registro de aceleración SCT.

### 5.1 Modelo de interacción suelo-estructura

De acuerdo con las características geométricas de la base del acelerógrafo que se tiene en la estación SCT y que fueron mencionadas en el capítulo 3, en la figura 5.1 se muestra el modelo de interacción suelo-estructura adoptado en este trabajo. Tal modelo es similar al utilizado en la investigación citada en la ref. 14 y consiste de una base rígida embebida en un semiespacio elástico. Además cuenta con dos grados de libertad, uno de desplazamiento horizontal,  $v_0$  y otro de giro,  $\theta$ . Las rigideces correspondientes se encuentran acopladas debido a que un giro unitario sin desplazamiento, requiere de un momento, así como de una fuerza externa que le impida trasladarse; de igual forma un desplazamiento unitario necesita de una fuerza que lo desplace y de un momento que le impida rotar.

Considerando la hipótesis de desplazamientos pequeños y respuesta lineal, la ecuación matricial del movimiento en el dominio de las frecuencias para el modelo mostrado en la figura 5.1 es:

$$M\ddot{v} + K\dot{v} = \underline{f} \quad (5.1)$$

donde los dos puntos sobre la variable indican doble diferenciación con respecto al tiempo; el guion sobre la variable significa su transformada en el dominio de las frecuencias; y el colocado abajo indica que la variable es un vector. En la ecuación 5.1, M y K representan las matrices de masa y rigidez del sistema suelo-base respectivamente;  $\dot{v}$  es la transformada del vector de desplazamientos y  $\underline{f}$  es la transformada del vector de fuerzas para la respuesta sísmica. El vector de desplazamientos es (fig 5.1):

$$\underline{v} = \{v_0, \theta\}^T \quad (5.2)$$

donde el superíndice,  $T$ , representa la transpuesta.

Las matrices de masas y rigideces son:

$$M = \begin{bmatrix} m & mh_0 \\ mh_0 & mh_0^2 + I_r \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

El vector de fuerzas para la respuesta sísmica de la estación está dado por:

$$\bar{f} = (m, mh_0)^T \ddot{v}_0 \quad (5.5)$$

En las ecuaciones 5.2 a 5.5 ; los símbolos  $m$  e  $I_r$  son la masa y el momento de inercia rotacional de la base;  $h_0$  es la distancia del centro de gravedad de la base a la superficie de contacto suelo-base;  $K_{ij}$  ( $i, j=1,2$ ) son las funciones de impedancia del sistema suelo-base, el subíndice 1 corresponde a  $v_0$  y el 2 a  $\theta$ ,  $v_0$  es la aceleración horizontal de campo libre. El desplazamiento  $v_0$  es medido respecto al movimiento de campo libre durante el temblor.

La matriz de masas,  $M$ , es real, simétrica y constante con respecto a las frecuencias consideradas, mientras que la matriz de rigideces dinámicas o impedancias,  $K$ , es compleja, simétrica y función de la frecuencia en estudio.

La solución  $\bar{v}$ , de la ecuación 5.1 representa la respuesta sísmica del sistema suelo-base, la cual puede expresarse en términos de la aceleración de campo libre,  $\ddot{v}_0$ , de manera directa. Por otra parte con la ecuación 5.6 se puede valuar el movimiento registrado por el acelerógrafo,  $\bar{v}_r$ .

$$\bar{v}_r = \bar{v}_0 + \bar{v}_0 + \begin{bmatrix} h_0 + h_1 \end{bmatrix} \ddot{\theta} \quad (5.6)$$

donde  $h_1$  es la altura del elemento registrador del acelerógrafo sobre el centro de gravedad de la base de concreto fig. 5.1. Si por el contrario se desea calcular  $\bar{v}_0$  en términos de  $\bar{v}_r$  se tiene la ecuación 5.7 (ref. 14).

$$\bar{V}_m = \bar{V}_r / \left[ 1 - \left[ 1/\det B \right] \left[ \sum_{j=1}^2 B_{1j} f_{1j} + (h_0 + h_1) \sum_{j=1}^2 B_{2j} f_{2j} \right] \right] \quad (5.7)$$

donde  $\det B$  es el determinante de la matriz  $\left[ M - K/w^2 \right]$ ;  $B_{1j}$  son los elementos de la adjunta de  $\left[ M - K/w^2 \right]$   $M$  y  $K$  se definirón previamente, ec. 5.3,  $f_j$  son los elementos de  $(-\bar{f}/\bar{V}_m)$  y se calculan con la ecuación 5.5

## 5.2 Funciones de impedancia

Los modelos disponibles para estudiar los efectos suelo-cimentación pueden ser clasificados en dos tipos dependiendo de la forma en la cual el suelo es idealizado. Uno es el llamado planteamiento continuo y el otro es el denominado del elemento finito. En el primero el suelo es usualmente idealizado como un semi-espacio (refs. 20, 21 y 22), así mismo también se dispone de modelos para medios estratificados (refs. 23, 24 y 25). Con el método del elemento finito el suelo es modelado como una región discretizada finita, compuesta de pequeños elementos, donde las características del material y geometría de estos últimos puede variar, de acuerdo a las características específicas del suelo en cuestión (ref. 26)

Las funciones de impedancia son comunmente expresadas como la suma de una componente real y una imaginaria. Debido a esta representación matemática, la cual asemeja la obtenida para un sistema lineal viscoelástico, los componentes de las funciones de impedancia han sido asociados a un resorte equivalente y a un amortiguador viscoso, respectivamente. Desde el punto de vista físico al resorte se pueden asociar las propiedades de rigidez del suelo y al amortiguador la energía disipada por las ondas que se reflejan en la cimentación y se propagan en el medio. Este último es conocido como el amortiguamiento por radiación del suelo. Tanto el resorte como el amortiguador son función de: las propiedades del suelo, las características geométricas de la cimentación y la frecuencia. Las funciones de impedancia son comunmente expresadas como:

$$K_s = K_s(k_s + i a_0 c_s) \quad (5.8)$$

en la cual: el subíndice  $j$  se refiere al modo de vibrar considerado (horizontal, rotacional, vertical, etc.);  $K_j^0$  es la rigidez estática;  $k_j$  y  $c_j$  son coeficientes adimensionales de rigidez y amortiguamiento respectivamente; y  $a_0$  es la frecuencia adimensional definida como:

$$a_0 = \frac{wB}{V_s} \tag{5.9}$$

donde:  $B$  es la dimensión típica de la cimentación (radio si es circular o la mitad del ancho si se trata de una cimentación cuadrada o rectangular, fig. 5.1);  $w$  es la frecuencia circular en rad/s;  $V_s$  es la velocidad de propagación de ondas de cortante del suelo. El efecto del amortiguamiento histerético del suelo se puede incorporar a las funciones de impedancia mencionadas modificando la ecuación 5.8 como sigue:

$$K_j = K_j^0 \left[ \bar{k}_j + ia_0 \bar{c}_j \right] \left[ 1 + i2D \right] \tag{5.10}$$

donde los coeficientes  $\bar{k}_j$  y  $\bar{c}_j$  corresponden a los casos de material puramente elástico.

Como una primera aproximación al problema en estudio, en este trabajo se utilizarán las funciones de impedancia propuestas en la ref. 20, las cuales proporcionan valores comparables a los de modelaciones mas refinadas como las propuestas en las refs. 21 y 22.

En las figuras 5.2 y 5.3, tomadas de la ref. 20, se muestran los valores de  $\bar{k}_x$ ,  $\bar{c}_x$ ,  $\bar{k}_\theta$  y  $\bar{c}_\theta$ , los cuales son los factores de rigidez y amortiguamiento dinámico, para los desplazamientos horizontales y los giros respectivamente (fig. 5.1). Estos factores corresponden a cimentaciones rígidas rectangulares embebidas en un semiespacio elástico. Dichos valores se utilizaron para obtener las funciones de impedancia  $K_{11}$  y  $K_{22}$  de la ec. 5.4. Los valores de rigidez acoplada  $K_{12} = K_{21}$ , de la misma ecuación, se obtuvieron calculando la altura del centro de rigidez de la base por medio de la figura 5.4 y multiplicando dicha altura por la rigidez lateral,  $K_{11}$  (ref. 20). En las figuras 5.2 a 5.4 los parámetros  $a_0$ ,  $B$  corresponden a los definidos para la ec. 5.9 y a la profundidad de embebimiento fig. 5.1.

Las rigideces estáticas  $K_j^0$  de la ec. 5.10 se obtuvieron como se indica a continuación (ref. 20): Con las gráficas mostradas en las

figuras 5.5 y 5.6 se obtuvo la rigidez estática considerando la base como superficialmente apoyada en el semiespacio. Donde  $G$  y  $B$  son: la rigidez al cortante del suelo y la dimensión típica de la base respectivamente. Los valores obtenidos en el paso anterior se modifican para considerar el efecto de embebimiento, para lo cual se utilizaron las gráficas mostradas en la fig. 5.7.

### 5.3 Función de transferencia teórica para la estación

El denominador de la ec. 5.7 representa la función de transferencia (FT) del sistema suelo-base mostrado en la fig. 5.1. En lo que sigue a dicha FT se le denominará teórica debido a que se calculará a partir del procedimiento descrito en 5.2, el cual se basa en un modelo matemático (ref.20).

Para determinar las rigideces dinámicas teóricas del sistema suelo-base (del acelerógrafo) se considera a la base como apoyada sobre un semiespacio elástico, por lo cual es necesario definir los valores representativos de  $V_s$ ,  $G$ ,  $D$  y  $\mu$ , para este último. A continuación se indican los valores adoptados para esos parámetros con el fin de estudiar teóricamente el fenómeno de interacción suelo-estructura en la estación de registro de aceleración SCT.

a) Velocidad de propagación de las ondas de cortante,  $V_s$ .

En la figura 2.3 se muestra la  $V_s$  correspondiente a la estratigrafía superficial en la estación SCT obtenidos por los métodos de la sonda suspendida y del down-hole (ref. 9).

Para la selección de  $V_s$  se consideró que los primeros treinta metros de la estratigrafía en SCT, podrían ser los que determinarían el valor de la velocidad de propagación de las ondas de cortante en el semiespacio, por lo cual se adoptó una  $V_s=70$  m/s. Esta última es el valor medio pesado (con respecto al espesor de los estratos) de las  $V_s$  hasta la profundidad mencionada. Es decir se hizo la hipótesis (de acuerdo con la ref. 23) de que los estratos hasta esa profundidad influirían en la respuesta dinámica de la base, dado que las dimensiones de esta son pequeñas comparadas con la profundidad elegida. En la elección de este valor para  $V_s$  también influyó el hecho de que a partir de 30 m las propiedades del suelo en la estación SCT tienen un cambio significativo con respecto a los estratos superiores (fig. 2.3).

b) Módulo de rigidez al cortante,  $G$ .

En la figura 5.8 se muestra la variación de  $G$  con la profundidad de los suelos de la estación SCT. Dichos valores se obtuvieron a partir de las  $V_s$  de la fig. 2.3, así como de los valores del peso específico de los suelos del sitio (ref. 9). A partir de los valores de la fig. 5.8 y siguiendo un criterio similar al adoptado para

determinar la  $V_s$  promedio, el valor de  $G$  correspondiente es de  $0.065 \text{ Ton/cm}^2$ .

c) Relación de amortiguamiento interno,  $D$ .

En estudios analíticos recientes sobre la respuesta sísmica de los suelos para el sitio de interés (ref. 30) se utilizó un valor de  $D$  de  $0.05$ . Este valor proporcionó resultados aceptables para la determinación de los espectros de respuesta de sitio en SCT, por lo cual se adoptará en este trabajo como representativo del amortiguamiento del semiespacio.

d) Módulo de Poisson,  $\mu$

De acuerdo con la ref. 31 el valor de  $\mu$  afecta ligeramente (en comparación con los otros parámetros) la respuesta dinámica de los suelos y dado que los coeficientes de rigidez dinámica (subcap. 5.2) que se utilizaron en este trabajo se obtuvieron para  $\mu = 0.33$ , este es el valor de  $\mu$  que se adopta como representativo de los suelos en la estación SCT.

En relación a los parámetros del modelo de interacción suelo-estructura que dependen de la geometría de la base, estos se obtienen a partir de la fig. 3.4. Finalmente los parámetros necesarios para calcular la función de transferencia teórica de SCT son los siguientes: dimensión característica de la base,  $B = 0.5 \text{ m}$ ; profundidad de embebimiento,  $E = 1.0 \text{ m}$ ; sobreelevación de la base,  $H_s = 0.3 \text{ m}$ ; peso específico de la base,  $W = 2.3 \text{ Ton/m}^3$ ; módulo de rigidez al cortante del suelo  $G = 650 \text{ Ton/m}^2$ ; velocidad de propagación de las ondas de cortante,  $V_s = 70 \text{ m/s}$ ; porcentaje de amortiguamiento del suelo,  $D = 0.05$ , módulo de Poisson,  $\mu = 0.33$ .

Con los parámetros mencionados y de acuerdo a 5.3 las rigideces dinámicas (ec. 5.4 y 5.10) correspondientes al sistema suelo-base de interés, se muestran en las figs. 5.9 a 5.11. Con dichas rigideces, así como los elementos de  $M$  y  $f$  (ecs. 5.3 y 5.5) se aplicó la ec. 5.7 para valuar la FT teórica de la estación SCT, la cual se presenta en la fig. 5.12. De acuerdo a esta figura de  $0$  a  $15 \text{ Hz}$  la FT es menor que  $1$ , con un valor mínimo de  $0.6$  entre  $10$  y  $11 \text{ Hz}$  y de  $15$  a  $30 \text{ Hz}$  la FT es mayor que  $1$  con un máximo de  $2.30$  en aproximadamente  $27 \text{ Hz}$ .

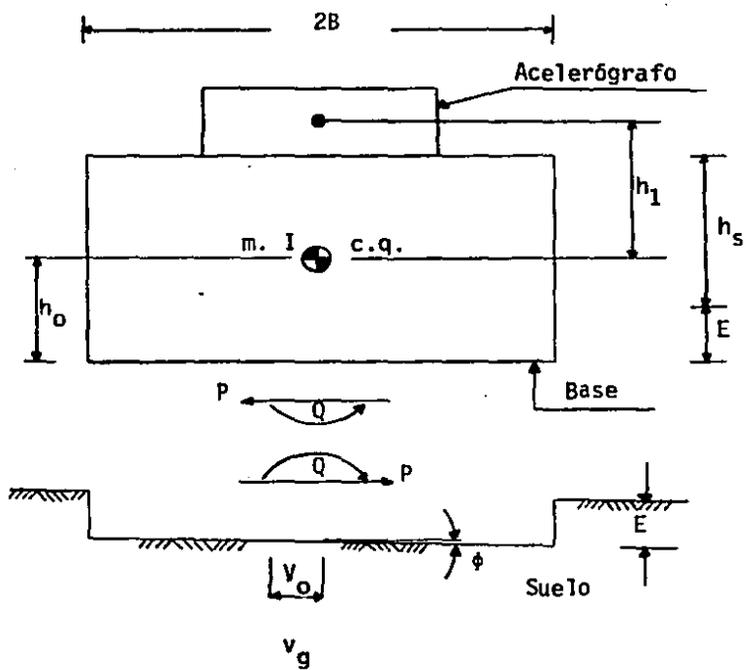


Fig 5.1 Modelo de interacción suelo-base en la estación SCT

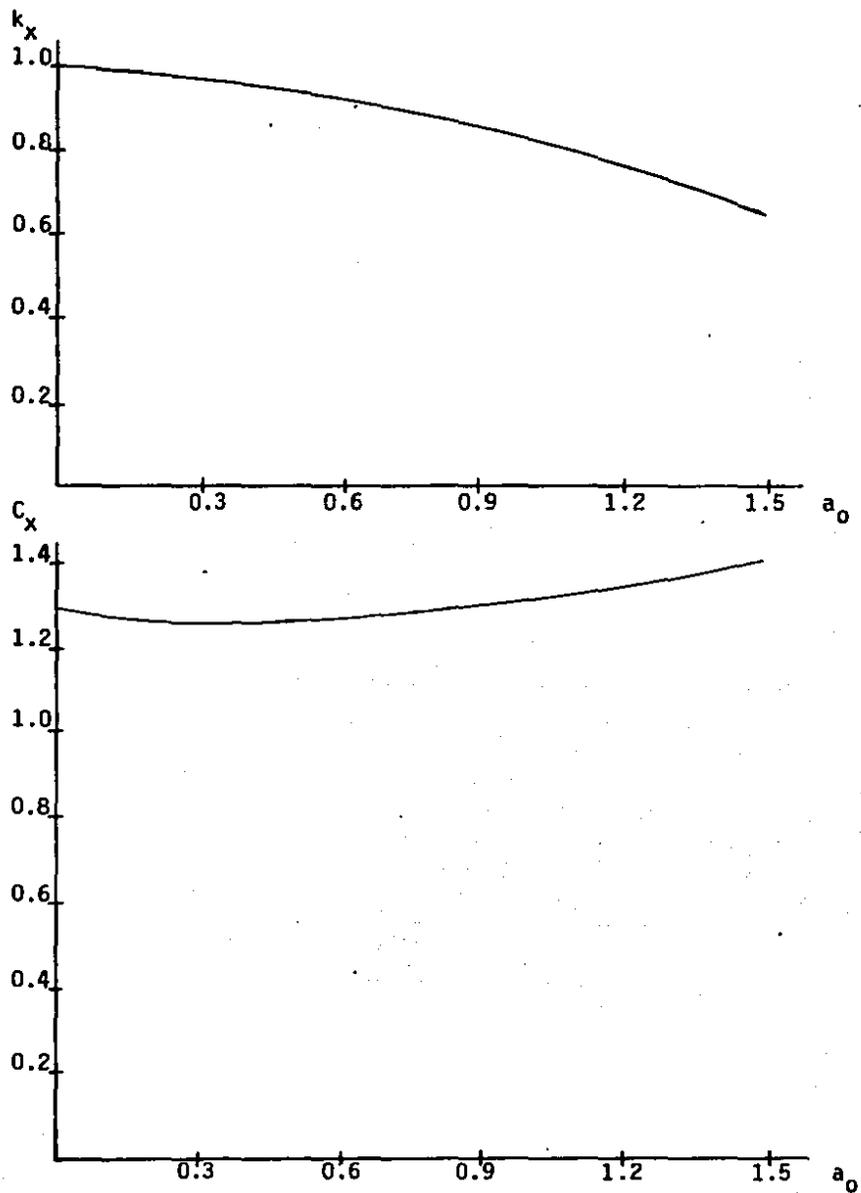


Fig 5.2 Coeficientes de rigidez horizontal. Cimentación enterrada de sección cuadrada,  $E/B = 2$  (ref. 20).

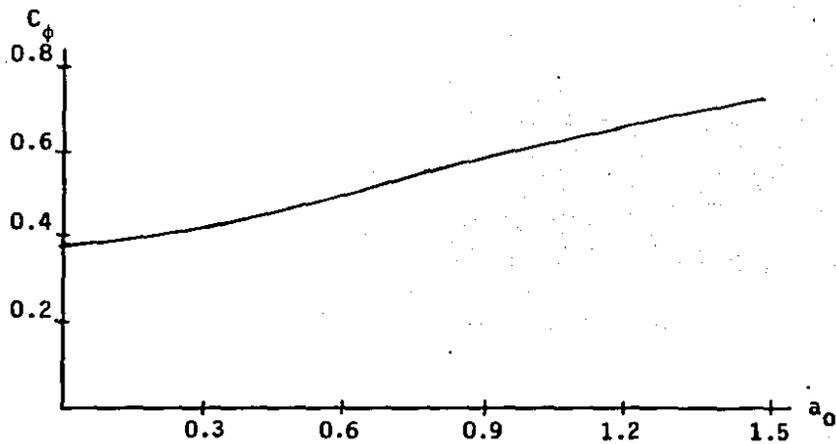
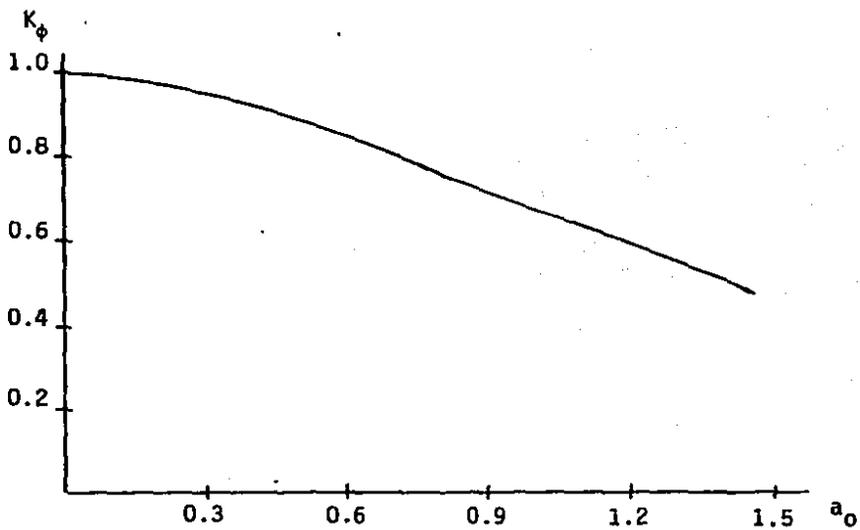


Fig 5.3 Coeficientes de rigidez de cabeceo. Cimentación enterrada de sección cuadrada,  $E/B = 2$  (ref. 20).

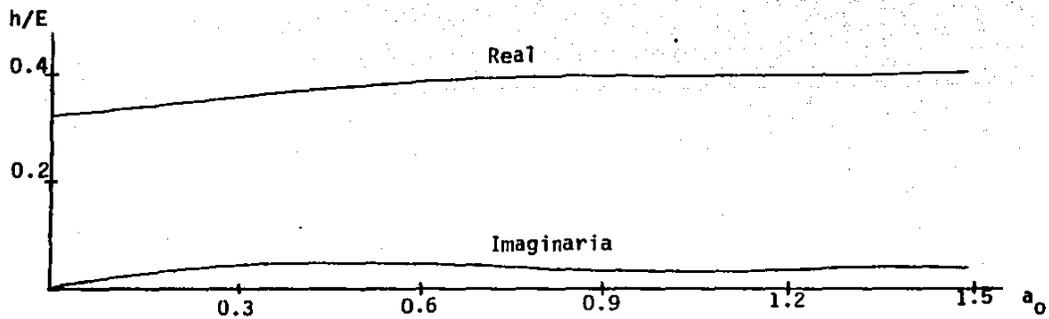


Fig 5.4 Altura del centro de rigidez para cimentaciones enterradas de sección cuadrada,  $E/B = 2$  (ref. 20)

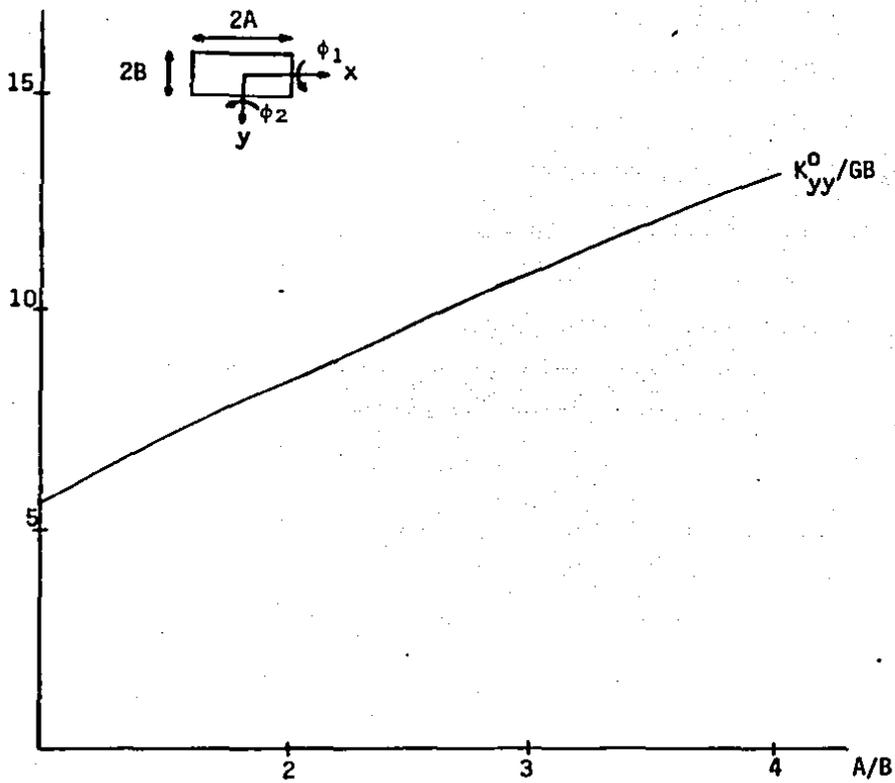


Fig 5.5 Rigidez estática para cimentaciones superficiales rectangulares. Desplazamientos (ref. 20)

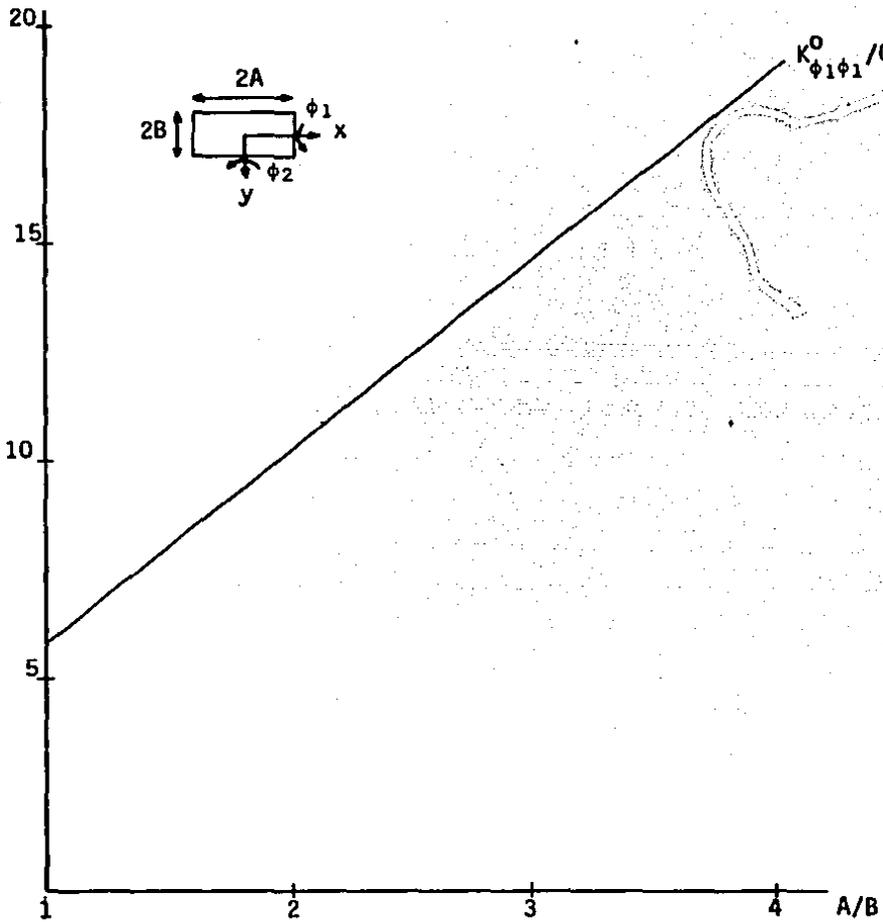


Fig 5.6 Rigidez estática para cimentaciones superficiales rectangulares. Rotaciones (ref. 20).

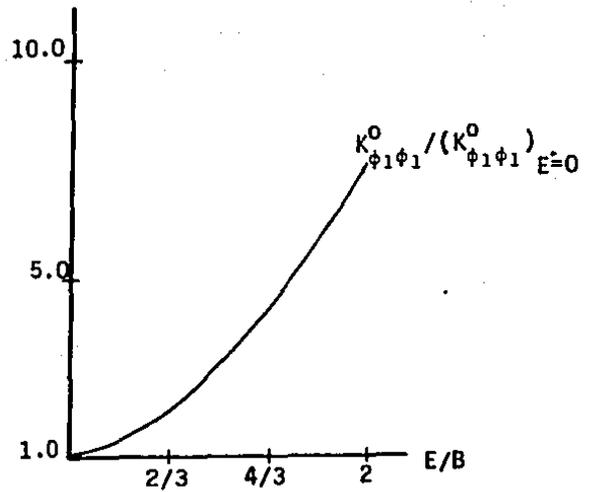
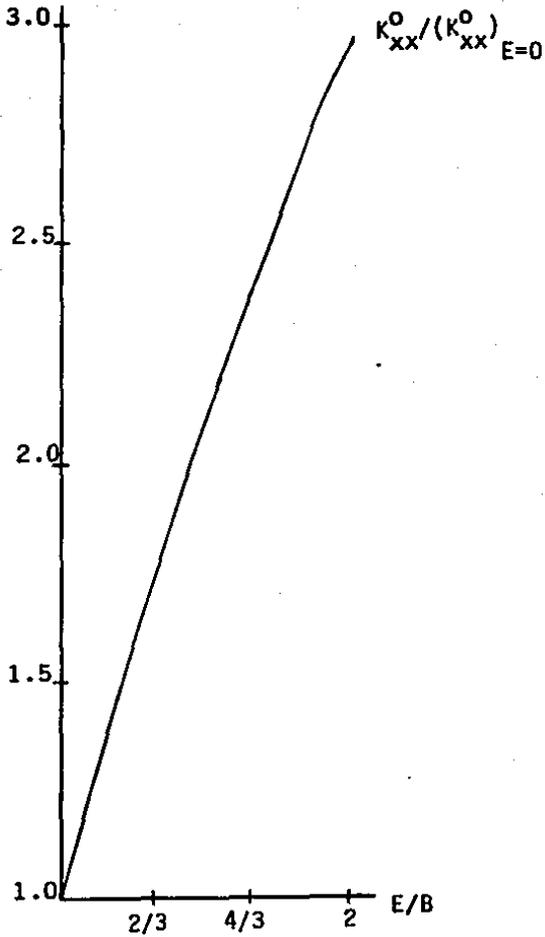


Fig 5.7 Rigidez estática para cimentaciones enterradas de sección cuadrada (ref. 20).

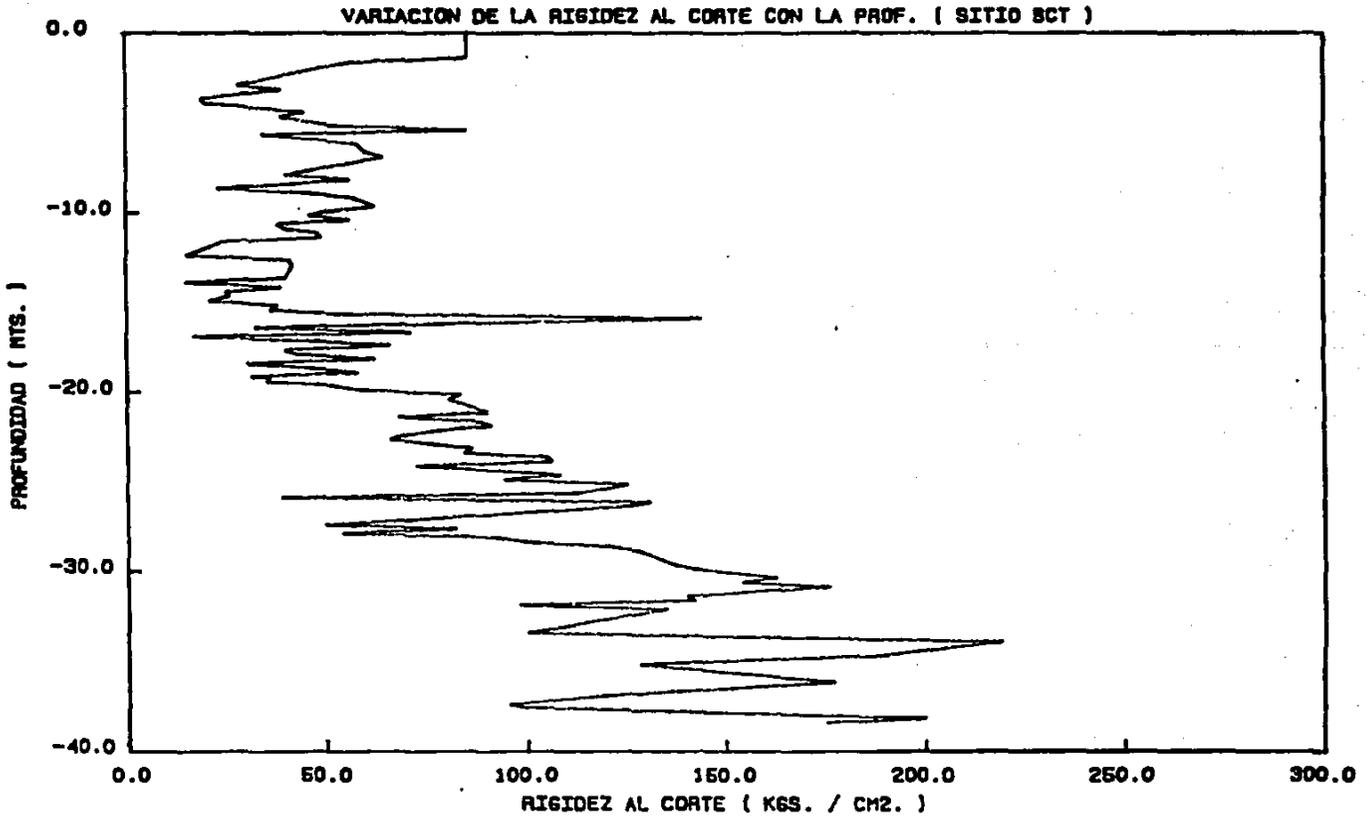
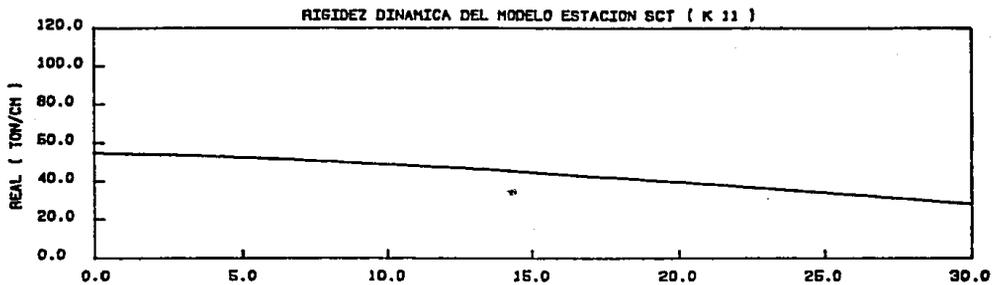
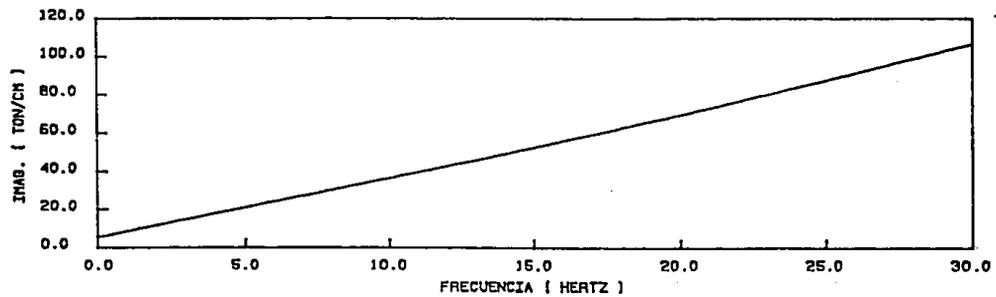


Fig 5.8 Variación de la rigidez al corte con la profundidad en el sitio SCT, (ref. 9).



a) Parte real



b) Parte imaginaria

Fig 5.9 Rigidez dinámica del modelo de la estación SCT ( $K_{11}$ ).  
 a) Parte real  
 b) Parte imaginaria

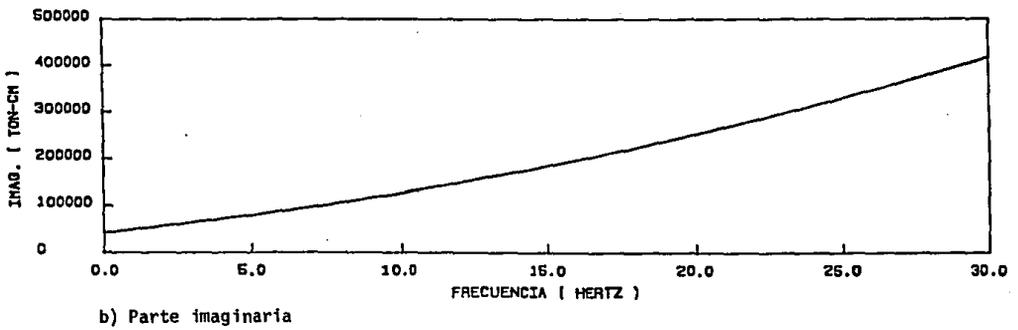
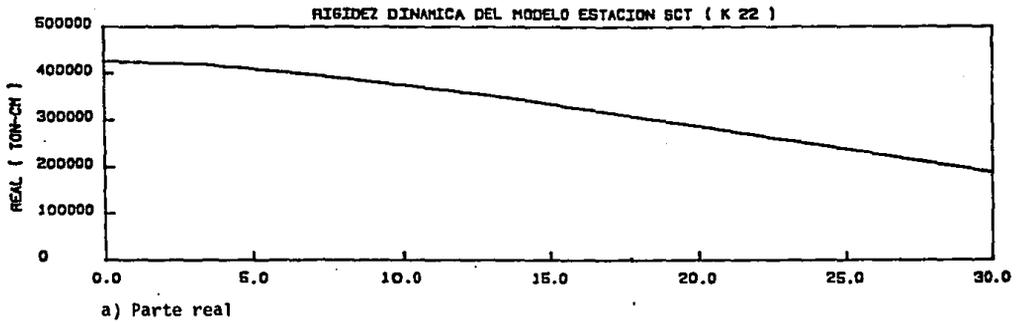
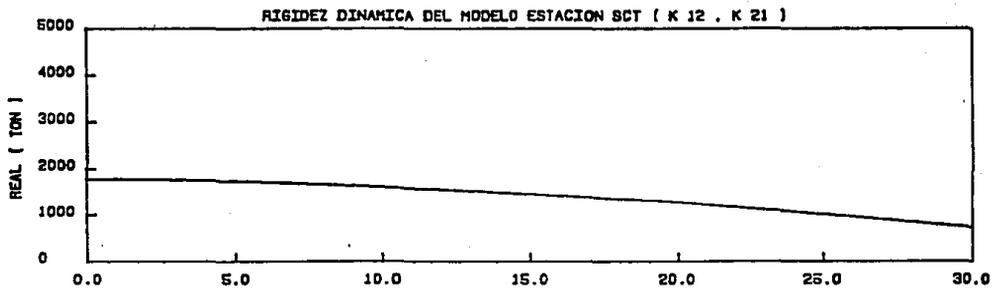
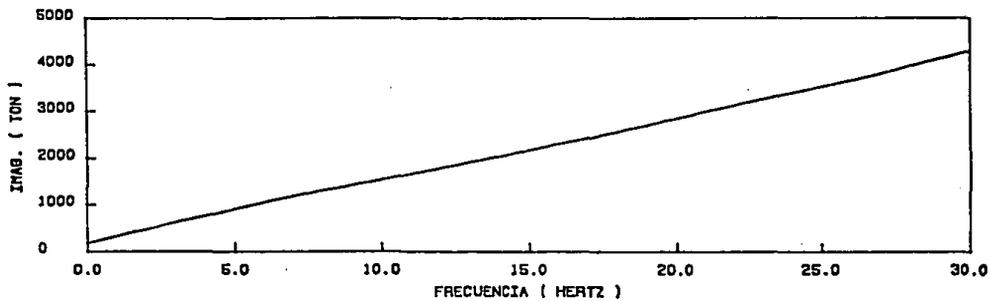


Fig 5.10 Rigidez dinámica del modelo de la estación SCT ( $K_{22}$ ).  
 a) Parte real  
 b) Parte imaginaria



a) Parte real

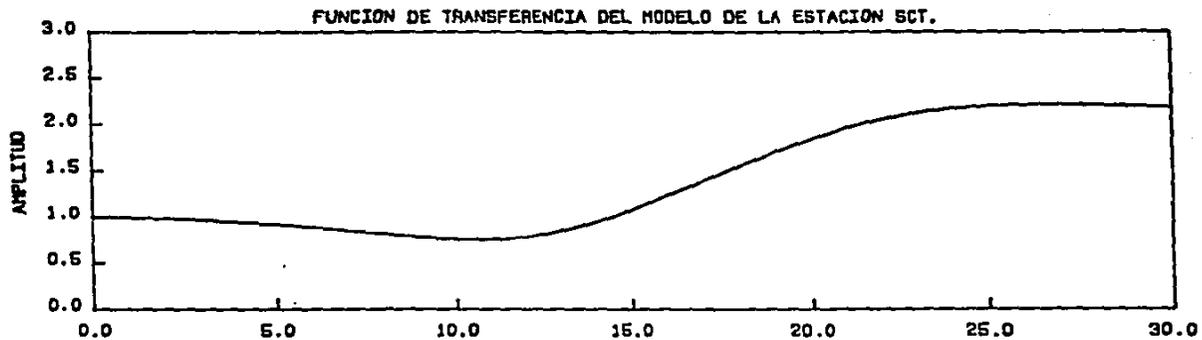


b) Parte imaginaria

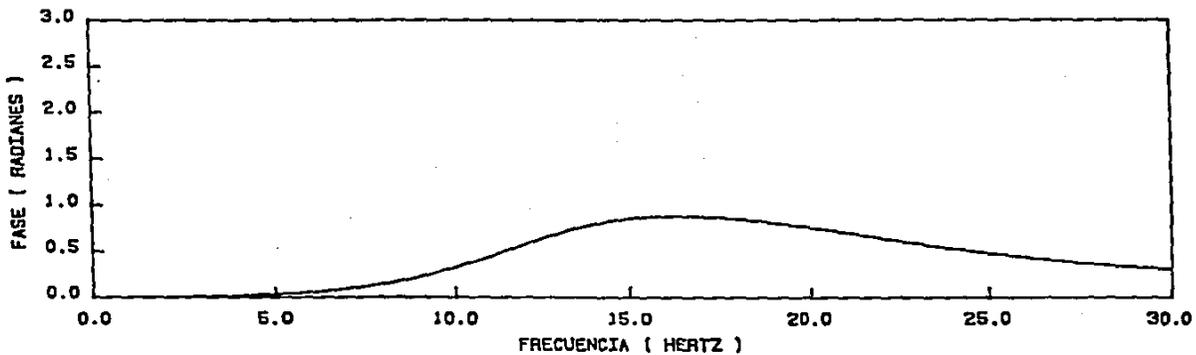
Fig 5.11 Rigidez dinámica del modelo de la estación SCT (K<sub>12</sub>, K<sub>21</sub>).

a) Parte real

b) Parte imaginaria



a) Parte real



b) Parte imaginaria

Fig 5.12 Función de Transferencia del modelo de la estación SCT.  
a) Parte real  
b) Parte imaginaria

## 6. ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEORICOS DE LOS EFECTOS DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA EN LAS ESTACIONES DE INTERES.

Se hace un análisis de los resultados experimentales presentados en el capítulo 4, primeramente resaltando las características de los espectros de Fourier para posteriormente tratar los resultados de la función de transferencia (FT) obtenida de realizar la razón espectral (RE) entre los espectros de Fourier de amplitud de velocidad de los registros del sistema fijo y móvil. Además se presenta un arreglo, a manera de resumen, de cada componente para las direcciones en que se ubican los sitios de registro, con el fin de establecer la magnitud del fenómeno de interacción suelo-estructura dependiendo de la cercanía del punto de medición respecto a la base del acelerógrafo. Se comparan las FT obtenidas en las cuatro ERA. Por último se hace una comparación entre las FT teóricas y experimental para la ERA SCT1.

Con el fin de evitar confusiones, en lo que sigue se entenderá por "componente N-S, E-O ó VERT" la dirección en que el sensor del sismógrafo detectó el movimiento. En el caso de expresar el término "dirección N-S o E-O" se entenderá como la dirección en que se encuentran ubicados los sitios de registro. El rango de frecuencias por analizar será el comprendido entre 0.3 y 20 Hz que corresponden a la parte plana de la curva de magnificación de los sistemas utilizados para el registro (fig 4.2).

Cuando se mencione que la FI correspondiente a un cierto punto deamplifica se entenderá que nos referimos a la base de la estación en relación al movimiento en el punto en el campo libre.

### 6.1 Análisis de los resultados experimentales de la estación Central de Abasto Oficina.

#### a) Espectros de Fourier de amplitud de velocidad.

Para todos los sitios de registro (001 al 004, fig 4.3) la transformada de fourier de amplitud de velocidad presenta una misma tendencia y las frecuencias asociadas a las máximas amplitudes son muy similares a las reportadas en la ref. 3 para los espectros de Fourier de amplitud de aceleración de los acelerogramas registrados en septiembre de 1985.

Para el canal vertical los valores máximos de amplitud espectral de velocidad, del orden de  $10^{-2}$  cm/seg, se encuentran en el intervalo de 1 a 3 Hz, además para frecuencias de hasta 0.7 Hz los valores de amplitud correspondientes siempre son menores que los obtenidos para los componentes horizontales. Después de 0.7 Hz la componente

vertical presenta un comportamiento muy similar a los horizontales pero siempre con valores de amplitud mayores, tal efecto es mas notorio en el caso de los registros obtenidos por medio del sistema fijo.

Componentes horizontales N-S y E-O. El comportamiento en ambas componentes es muy similar para todo el rango de frecuencias, a excepción de los sitios 001 y 004 tanto en registro fijo como móvil, puesto que se presentan diferencias muy marcadas en las frecuencias de 0.3 a 0.4 Hz. En todos los sitios se presenta un máximo en amplitud a 0.3 Hz del orden de  $0.8 \times 10^{-9}$  cm/s.

Entre 0.7 y 3 Hz los valores de amplitud oscilan alrededor de  $2 \times 10^{-9}$  cm/s, para posteriormente tener un decremento rápido (inclusive en la componente vertical) hasta alcanzar valores de  $7 \times 10^{-10}$  cm/s, en 10 Hz.

b) Función de Transferencia (FT) de los sitios en dirección E-O (001 a 004).

Para frecuencias entre 0.3 y 1 Hz los valores de la FT son ligeramente mayores a 1 en las 3 direcciones, a excepción del componente N-S de los sitios 001 y 002 para los cuales existen valores de FT menores a uno. Después de 1 Hz el comportamiento es diferente al anterior para los 3 componentes, así en los puntos 001 al 004 los valores de FT son menores a 1 siendo mayor el efecto en los componentes horizontales, esto indica deamplificación de los movimientos registrados en la caseta, mostrando también que ha medida que el punto de registro está mas cerca de la caseta la deamplificación es menor, sobre todo en el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz. Por ejemplo para el sitio 002 en el intervalo de frecuencias antes señalado la FT es del orden de 2.5 veces, mientras que para los puntos 003 y 004, que están más próximos a la caseta, se tienen deamplificaciones del mismo orden solo en las frecuencias de 3 y 9 Hz.

Después de 10 Hz los valores de FT se incrementan rápidamente teniéndose a 20 Hz los valores máximos de FT (3 a 5 veces en amplificación).

c) Función de Transferencia (FT) por componente para todos los sitios.

Componentes N-S (fig. 6.2).

En el rango de frecuencias de 0.3 a 1 existe deamplificación en la FT del punto 001 (que es el más alejado) de 2 veces para una frecuencia de 0.5 Hz, en ese mismo rango el punto más cercano a la caseta (004) tiene valores de FT muy próximos a 1. Sin embargo los puntos intermedios (002 y 003), muestran efectos importantes tanto

en amplificación como en deamplificación, sobre todo en el punto 003 que a 0.7 Hz FT es de 1.5 veces. Para este componente la tendencia es: deamplificación en el punto más lejano, aproximarse a valores de FT=1, sobrepasarlo presentando efecto de amplificación (puntos 002 y 003) y nuevamente regresar a la tendencia de FT=1.

Para frecuencias de 1 a 10 Hz la tendencia es la siguiente: a partir de valores de FT=1, estos disminuyen para todos los sitios, teniendo 3 mínimos importantes muy bien definidos para los puntos 001 y 002 con valores de FT de 0.4, 0.3 y 0.25 para frecuencias de 1.3, 3 y 9 Hz respectivamente, después de cada mínimo existe la tendencia en las FT a incrementar su valor pero siempre inferior de 1.

Al parecer en este componente el efecto de deamplificación en la caseta es mas grande a medida que el punto está mas alejado, para el rango de frecuencias entre 1 y 10 Hz, después de 10 Hz los valores de razón espectral aumentan en forma muy rápida, conservando una tendencia muy similar todos los sitios, teniéndose a 20 Hz FT iguales a 4 (puntos 001 y 002), 2 (en 003) y 1 (en 004).

Componentes E-O (fig. 6.3).

En general, el comportamiento de las FT es similar al observado para los componentes N-S. Dentro del rango de 0.3 a 1 Hz se presenta en todos una pequeña amplificación (FT=1.3), después de 1 Hz los valores de FT son en deamplificación inclusive mayores que los de los componentes N-S, estos mínimos son en el punto 001 que es el más lejano a la estación. En el rango de 1 a 10 Hz la tendencia a la deamplificación se mantiene para todos los puntos siendo mayor para el mas lejano, y a medida que la distancia con la caseta es menor la deamplificación disminuye. Después de 10 Hz la FT aumenta, alcanzando en 20 Hz el valor de 3.5 veces en amplificación (sitio 001).

Componentes Verticales (fig. 6.1).

Para frecuencias entre 0.3 y 1 Hz el punto 001 presenta un máximo en amplificación de 3 veces a una frecuencia de 0.7 Hz, los demás puntos tienen amplificación máxima de 0.5 veces y tienden a oscilar en la línea de FT=1 inclusive hasta unos 3 Hz, situación que no sucede con el punto 001 el cual a 1.5 Hz presenta deamplificación de 2 veces.

Aproximadamente en 2.5 Hz todos los puntos tienen valores de FT menores a 1, a excepción del 001 que en 0.5 Hz muestra un máximo en amplificación de 1.5 veces. Después de 10 Hz la tendencia es similar a los componentes horizontales, es decir un incremento acelerado en los valores de FT teniéndose a 20 Hz valores de FT del orden de 3.5 a 4 veces. Podemos decir que los puntos 002, 003 y 004 tienen un comportamiento muy similar entre ellos y en general con los componentes horizontales, aunque en el rango, de 1 a 10 Hz el efecto

de deamplificación es menor. El punto 001 presenta un comportamiento completamente distinto a los otros.

## 6.2 Análisis de los resultados experimentales de la estación Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

### a) Espectros de Fourier de amplitud de velocidad.

En las figuras 4.19 a 4.22 se muestran los espectros de Fourier de amplitud de velocidad en la dirección E-O (puntos 001 a 004) y en las figuras 4.23 a 4.26 se presentan los de la dirección N-S (puntos 005 a 008) para los 3 componentes tanto del sistema fijo como del móvil.

El comportamiento de los componentes horizontales es muy similar entre si para todo el rango de frecuencias mostrado. Su forma tiene mucha similitud con los espectros presentados en las refs. 3 y 19, teniendo en 0.5 Hz aproximadamente, unos máximos de amplitud espectral, que para estas mediciones fueron del orden de  $10^{-3}$  cm/s. Existe otro máximo en frecuencias muy próximas a los 2 Hz, después los valores en amplitud disminuyen a medida que se incrementa la frecuencia, teniéndose en 20 Hz amplitudes de  $10^{-4}$  cm/s en los registros del sistema fijo, en el caso del sistema móvil tales amplitudes llegan a alcanzar valores de  $10^{-3}$  cm/s.

En ambas direcciones se presentan dos máximos en amplitud espectral uno a 0.5 Hz y otro a 2 Hz. Para los componentes horizontales se observa lo siguiente: En la dirección E-O (puntos 001 a 004, figs 4.19 a 4.22) la amplitud mayor se presenta a 0.5 Hz, mientras que en la dirección N-S (puntos 005 a 008, figs 4.23 a 4.26) la amplitud mayor es a 2 Hz.

Respecto al componente vertical podemos decir que su comportamiento es completamente distinto al señalado arriba, puesto que para frecuencias que van hasta 1 Hz las amplitudes espectrales siempre son menores a los horizontales teniendo valores inferiores a  $10^{-4}$  cm/s. Para frecuencias superiores a 1 Hz tiene una tendencia similar a los componentes horizontales pero ahora con valores de amplitud siempre mayores. El valor de amplitud máximo en éste componente se encuentra alrededor de 2 Hz.

### b) Función de Transferencia de los sitios en dirección E-O (001 a 004, figs 4.19c, 4.20c, 4.21c y 4.22c).

Los valores de FT, para frecuencias comprendidas entre 0.3 y 2 Hz, se encuentran entre 1 y 1.5 para los 3 componentes en todos los sitios lo que indica que el efecto de interacción suelo-estructura en este rango de frecuencias es muy pequeño pero a partir de los 2 Hz se presenta un aumento sistemático en los valores de FT siendo

mayor en el componente E-O y menor en el vertical. A 20 Hz en el punto mas alejado de la estación (001) se tienen amplificaciones de casi 20 veces para los componentes horizontales y de 7 en el vertical. Los valores antes mencionados tienden a disminuir a medida que se está mas cerca de la estación, así para el sitio (004) la FT en los horizontales es de 10 y prácticamente 1 en el vertical.

c) Función de Transferencia (FT) de los sitios en dirección N-S (005 a 008, figs 4.23c, 4.24c, 4.25c y 4.26c).

Esta dirección presenta un comportamiento muy similar al descrito anteriormente, es decir en el rango de 0.3 a 2 Hz valores de FT de 1.5 en amplificación, aunque también se presentan tendencias de deamplificación en los puntos intermedios 006 y 007 con valores importantes del orden de 3 veces para los componentes N-S (punto 006) y vertical (punto 007). En el sitio 005 el componente vertical (fig. 4.23c) presenta valores de amplificación muy grandes, en realidad se considera que existió alguna falla al momento de registro en este canal. Después de 2 Hz al igual que en la otra dirección los componentes horizontales presentan un aumento sistemático en amplificación, siendo mayor en el componente E-O.

La diferencia existente en ésta dirección con la de los puntos 001 a 004 es que la máxima amplificación (punto 005), para 20 Hz, es de 10 veces y no de 20 como sucede en el sitio 001. El valor de 10 veces se conserva aun cuando el punto esté mas cerca de la caseta.

d) Función de Transferencia (FT) por componente para todos los sitios.

Las figs. 6.4 a 6.9 presentan un arreglo de la FT, por componente en las dos direcciones de medición, con el se sintetiza la información correspondiente a las razones espectrales.

FT de los puntos en la dirección E-O.

Los componentes horizontales (NS y EO) figs. 6.5 y 6.6 presentan amplificaciones de hasta 3 veces para el rango de 0.3 a 0.5 Hz y para frecuencias comprendidas entre 0.5 y 1.5 Hz disminuyen a menos de 2 veces, considerándose prácticamente nulas de 0.5 a 1.0 Hz en la dirección NS.

Para frecuencias mayores a 1.5 Hz la amplificación aumenta en forma sistemática hasta los 20 Hz en donde alcanza un valor de aproximadamente 20 veces, en los componentes NS y EO para el sitio mas lejano a la estación (punto 001). En el caso del punto 004, que es el mas cercano, la amplificación es de unas 8 veces, lo cual sugiere que a medida que nos acercamos a la base del acelerógrafo la amplificación disminuye. Esto se corrobora con las amplificaciones en los puntos 002 y 003 que se ubican entre el 004 y el 001.

En el caso del componente vertical fig. 6.4 la amplificación máxima es de 2 veces entre 0.4 y 3 Hz. Para frecuencias que van de 4 a 20 Hz la amplificación es en promedio de 4 veces en los puntos mas alejados de la base (001 y 002). En el caso del punto mas cercano (004) la amplificación alcanza un valor máximo de 2 para todo el rango de frecuencias de interés.

FT de los puntos en la dirección N-S.

Las figs. 6.8 y 6.9 muestran los componentes horizontales de las FT para los sitios 005 a 008, se observa entre ellos un comportamiento muy similar. De 2 a 20 Hz la amplificación alcanza valores de 7 y 10 veces, en los componentes N-S y E-O respectivamente.

Para el componente vertical únicamente se muestran las FT de los sitios 006 y 007 (fig. 6.7), debido a que los demás registros para este componente se dañaron. Las amplificaciones máximas son de hasta 2 veces para algunos rangos (0.3 a 0.9, 2 a 3, y 15 a 20 Hz.) mientras que en otros, dentro del intervalo de interés son de 1.1 y 1.5 veces.

e) Comparación entre las FT de los sitios localizados en las direcciones E-O y N-S.

Las diferencias mas importantes entre las FT de los sitios localizados en las dos direcciones son las siguientes:

- En los componentes horizontales de los sitios 005 a 008 (dirección N-S) no se observa un aumento de amplificación a medida que nos alejamos de la base del acelerógrafo, como sucede en los sitios 001 a 004.
- Las amplificaciones para los componentes horizontales en los sitios 005 a 008 son ligeramente menores que las de los sitios 001 a 004.
- Respecto a los componentes verticales, la amplificación de 2 veces se presenta en todos los sitios.

### 6.3 Análisis de los resultados experimentales de la estación Tláhuac Bombas.

Como se indicó en el punto 4.3 de este trabajo, en la estación de registro de aceleración TLHB se realizaron 6 mediciones de microtemblores, 3 en dirección E-O (puntos 001 a 003) y 3 en dirección N-S (puntos 005 a 007). El análisis que se presenta está basado únicamente en los puntos de la dirección N-S, debido a que los espectros de Fourier de amplitud de velocidad, en la otra dirección, presentaban una influencia muy marcada de un sistema de

bombeo de aguas ubicado a un costado de los puntos de medición.

a) Espectros de Fourier de amplitud de velocidad (figs. 4.27 a 4.29).

Los espectros de Fourier de amplitud de velocidad presentan un máximo en los componentes horizontales, de  $10^{-2}$  cm/s (y de casi  $10^{-2}$  cm/s para el vertical), este máximo se encuentra asociado a frecuencias de 2 Hz. Los componentes horizontales muestran una tendencia similar, no así la vertical que para frecuencias menores de 0.7 Hz tiene amplitudes inferiores respecto a los horizontales, después de la frecuencia mencionada la situación se invierte. Aunque los componentes horizontales son muy similares el canal N-S, de todos los puntos, es ligeramente superior en amplitud al E-O para casi todos los valores en frecuencia.

Después del máximo en amplitud asociado a 2 Hz, las amplitudes tienden a disminuir conforme aumentan los valores en frecuencia, a excepción hecha a los 10 Hz en donde existe un aumento en todos los sitios, después el comportamiento vuelve a la tendencia descrita anteriormente, encontrándose a 20 Hz amplitudes del orden de  $10^{-2}$  cm/s.

b) Función de Transferencia (FT) de los sitios en dirección N-S. (005 a 007).

Para frecuencias entre 0.3 y 1 Hz los efectos en amplificación son mayores a medida que el sitio se ubica mas lejos de la estación acelerográfica llegando a tener valores de FT de 3 a 5 veces (punto 005), después del intervalo mencionado, en los sitios 006 y 007 se presenta un aumento en el valor de la FT, en los componentes horizontales, conforme aumenta la frecuencia. Los valores de amplitud del componente N-S son mayores que los del E-O hasta 8 Hz. Entre 8 y 10 Hz el componente E-O, en los 3 sitios, presenta el valor máximo en amplificación de casi 20 veces para los puntos 006 y 007 y de unas 10 veces para el 005. Este comportamiento sugiere que después de 1 Hz la interacción suelo-estructura produce amplificaciones de los movimientos registrados y que estas son mayores en puntos mas cercanos a la ERA. Lo anterior es principalmente observado para los componentes horizontales, el caso del vertical es distinto puesto que trata de mantenerse oscilando sobre la línea de FT igual a 1.

c) Función de Transferencia (FT) por componente para todos los sitios.

En las figs. 6.10 a 6.12 se muestra un arreglo por cada componente para todos los sitios de medición, en el se sintetiza la información.

En los componentes verticales (fig. 6.10) se observa que las funciones de transferencia oscilan alrededor de 1 para todo el rango de frecuencias en los 3 sitios, sin embargo existen amplificaciones importantes para frecuencias de 0.35, 0.6, 5, 10 y 20 Hz con valores de amplificación de 5.5, 2.5, 2, 1.8 y 2 veces respectivamente, a excepción del valor de 1.8 que corresponde al punto 007, los restantes están dados por el punto más lejano (005).

El componente N-S (fig. 6.11) presenta una tendencia creciente en amplificación a partir de 1 Hz, antes de esta frecuencia se tiene amplificación para el punto más lejano (005) de unas 3.5 veces en 0.35 Hz y deamplificación de 1.5 veces para los sitios 006 y 007 en 0.45 Hz. Para el rango de 0.5 a 1 Hz los valores de razón espectral tienden a 1. De 4 a 8 Hz se presentan las máximas amplificaciones para estos componentes y es de unas 7.5 veces (punto 005), después de 7 Hz los valores de la función de transferencia tienden a disminuir teniéndose en 20 Hz amplificaciones menores a 1.5 veces.

El componente E-O (fig. 6.12) para todo el rango de frecuencias analizado presentó únicamente efecto de amplificación. El rango comprendido entre 0.3 y 4 Hz tiene en promedio valores de 1.8 veces, después de 4 Hz los valores de FT aumentan alcanzando amplificaciones de 10 veces para el punto más lejano a la estación (005) y de 20 para los otros dos (006 y 007) posteriormente disminuyen las amplificaciones llegando a 2 veces, en todos los sitios, a 20 Hz.

#### 6.4 Análisis de los resultados experimentales de la estación Iláhuac Deportivo.

##### a) Espectros de Fourier de amplitud de velocidad (figs. 4.30 a 4.32).

El comportamiento de los espectros de Fourier de amplitud de velocidad es muy similar en los 3 sitios de medición, la tendencia dentro del rango de frecuencias de interés en este estudio es similar en los 3 componentes.

Entre 0.3 y 1 Hz la tendencia entre componentes es un poco distinta siendo el E-O el de amplitud mayor y el vertical el de menor, en 0.5 Hz se presenta un máximo en los 3 componentes con valores de  $2 \times 10^{-4}$ ,  $4 \times 10^{-4}$  y  $7 \times 10^{-4}$  cm/s para E-O, N-S y VERT en el sitio 004. En los puntos 005 y 006 también existe este máximo pero con valores de amplitud mayores llegando inclusive a  $3 \times 10^{-2}$  cm/s para el componente N-S en el sitio 006.

Después de 1 Hz el canal vertical es el que tiene las mayores amplitudes, a partir de esta frecuencia se presentan valores de amplitud ascendentes hasta llegar a 2 Hz en donde existe otro máxi-

mo en amplitud de  $2$  a  $3 \times 10^{-3}$  que es el que predomina en todos los sitios. Posteriormente los valores de amplitud comienzan a disminuir alcanzando valores de entre  $10^{-5}$  y  $10^{-4}$  cm/s en 20 Hz.

b) Función de Transferencia (FT) de los sitios en dirección N-S (005 y 006).

En el punto 005, entre 0.4 y 0.5 Hz, se presentan deamplificaciones de 2, 5 y 8 veces para los componentes E-O, VERT y N-S respectivamente. Para los componentes horizontales a partir de 0.7 Hz y hasta 10 Hz los valores de FT son mayores a 1, con tendencia creciente conforme aumentan los valores en frecuencia, así a 6 Hz se tienen las amplificaciones máximas de (2.5 veces). En el caso del componente vertical, para el intervalo de frecuencias entre 0.7 Hz y 10 Hz existen valores de amplificación y deamplificación de 1.5 y 1 vez.

Después de 10 Hz el comportamiento es distinto al del intervalo anterior de frecuencias, teniéndose hasta 20 Hz únicamente deamplificaciones cuyos valores máximos son de 6, 4 y 2 veces para los componentes N-S, E-O y VERT.

En el sitio 006 entre 0.3 y 0.4 Hz existen deamplificaciones importantes que se recuperan rápidamente en 0.4 Hz, a partir de esta frecuencia y hasta 9 Hz el componente E-O presenta únicamente amplificaciones, mientras que los N-S y VERT muestran deamplificaciones del orden de 1.5 veces como máximo. Entre 1 y 3 Hz la tendencia entre los 3 componentes es similar pero después de esta frecuencia y hasta 10 Hz, el componente vertical tiene valores de FT menores que los horizontales (inclusive menores a 1). Las amplificaciones máximas son de 3.5 en los componentes horizontales y de 2 en el vertical, ambos a 4 Hz. De 10 a 20 Hz la FT siempre es menor a 1 teniéndose deamplificaciones de casi 4 veces (componente N-S).

c) Función de Transferencia (FT) del sitio en dirección E-O (004).

Entre 0.3 y 0.6 Hz el componente E-O presenta amplificaciones máximas de 2 veces mientras que el N-S y el VERT tienen deamplificaciones de 1.5 veces. Después de 0.6 hasta 10 Hz el componente VERT oscila sobre la línea  $FT = 1$  alcanzando valores máximos de 1.5 en amplificación o deamplificación. Para el mismo intervalo (0.6 a 10 Hz) los componentes horizontales presentan únicamente amplificación teniendo su valor máximo de 3.5 a 7 Hz. A frecuencias mayores de 10 Hz solo existen efectos de deamplificación siendo a 20 Hz del orden de 3 veces.

d) Función de Transferencia (FT) por componente para todos los sitios.

FT del punto en la dirección E-O.

En el componente vertical (fig. 6.13) se observa que de 0.3 a 11 Hz la función de transferencia (FT) oscila alrededor de 1.0 con valores mínimos de 0.8 y máximos de 1.3. De 11 a 20 Hz se presenta deamplificación de 2 veces para la última frecuencia.

En relación a las FT para los componentes horizontales N-S y E-O (figs. 6.14 a 6.15), su comportamiento es muy similar, de 0.3 a 2 Hz oscilan alrededor de 1, alcanzando un máximo en deamplificación de 3.5 veces para la frecuencia de 8 Hz. Finalmente de 10 a 20 Hz los valores de las FT muestran deamplificación de 4 y 2 veces para los componentes N-S y E-O respectivamente.

FT de los puntos en la dirección N-S.

En el componente vertical (fig 6.16), de 0.3 a 0.8 Hz la FT presenta deamplificaciones de 5.5 y 3 veces para los sitios 5 y 6. En el rango de 0.8 y 5 Hz existe amplificación de 1.3 y 2.5 veces (sitios 5 y 6). Finalmente de 5 a 20 Hz se tiene deamplificación de 2 veces a 17 Hz.

En cuanto a los componentes horizontales (figs. 6.17 y 6.18), se observa que las FT tienen una forma similar a la registrada para el punto 004, con valores en deamplificación de 10 y 3 veces para los componentes N-S y E-O en el rango de frecuencias de 0.3 a 0.6 Hz. Para frecuencias comprendidas entre 0.6 y 10 Hz las amplificaciones son de hasta 4 veces en ambas direcciones, para el intervalo de 10 a 20 Hz los valores de FT son en deamplificación de 5 y 10 veces para N-S y E-O.

## 6.5 Comparación de las funciones de transferencia experimentales de las estaciones de interés

Antes de comparar las FT obtenidas de los estudios de microsismicidad en las ERA seleccionadas, es conveniente recapitular sobre sus principales características constructivas así como en cuanto a los tipos de suelos en que se apoyan.

Como se mencionó en el capítulo 2 las estaciones SCT Y CDAU se encuentran sobre suelos preconsolidados y vírgenes respectivamente de la llamada zona de lago; y las de TLHB y TLHD se localizan en la zona de los lagos Xochimilco-Chalco. Las propiedades específicas de los suelos en cada una de las ERA se discutieron en el capítulo 2 y en las figuras 2.3 a 2.6 se pueden observar las diferencias entre ellos en términos de Vs.

En lo que se refiere a las características geométricas y constructivas de las ERA de acuerdo al capítulo 3 se tiene lo

siguiente: La estación SCT consiste de una base de concreto reforzado (hueca) de 1.08x0.90 m de planta y 1.30 m de altura, enterrada 1.0 m; la base se localiza en un jardín, a 6.0 m de distancia de un edificio de concreto reforzado de 20x25 m de sección transversal y 12.0 m de altura (ref. 27).

La estación CDAO tiene una base de concreto de 0.60x0.41 m de planta y 0.40 m sobre el nivel del suelo la cual se encuentra desligada del sistema de piso del edificio, se ignora la profundidad de enterramiento; la base se encuentra dentro de una caseta de concreto, con techo y piso de concreto reforzado, las dimensiones de la caseta son 1.52x1.37 m de planta y 1.56 m de altura; la caseta a su vez se encuentra en un extremo de un edificio de muros de tabique y columnas de concreto reforzado de un nivel, de 25x40 m y 6 m de altura, los muros de la caseta están desligados del edificio, pero su piso está ligado al sistema de piso del edificio.

Las estaciones de TLHB Y TLHD ambas tienen una base de concreto de 0.51x0.59 m de planta y 0.50 m sobre el nivel del suelo, se supone que la base está enterrada 1m en el suelo; la base se encuentra en una caseta con muros de tabique, castillos, techo y losa de piso de concreto de 2.54x2.53 m de planta y 2.50 m de altura. Las únicas diferencias importantes entre estas dos estaciones es su ubicación (TLHD se encuentra en instalaciones deportivas sin edificios en su vecindad y TLHB en unas instalaciones de bombeo cerca de construcciones de 1 o 2 niveles) y en la forma en que las bases se desligan de la losa de piso; en TLHB la base está ligada al sistema de piso hasta una distancia de 0.40 m del pie de la misma, en tanto que la de TLHD está desligada de la losa de piso al pie de la base.

Con el fin de efectuar comparaciones entre las FT de las cuatro ERA, se seleccionaron las calculadas con relación a los sitios en que se consideró que se cumple con mayor grado la condición de "campo libre" mencionada en 1.2. Por tanto las FT corresponden a los puntos 1, 7, 5 y 6 para las estaciones CDAO, SCT, TLHB y TLHD respectivamente (figs. 4.4 a 4.6). En las figs. 6.19, 6.20 y 6.21 se muestran las FT para las componentes NS, EO y vertical.

De la fig. 6.19 (componente NS) se puede concluir que solo en el rango de 1 a 3.5 Hz las FT de SCT, TLHB y TLHD tienen un comportamiento muy parecido, de amplificación de la señal por la base. Dicha similitud se esperaría de las dos últimas estaciones dado que sus características constructivas son prácticamente iguales, como se señaló arriba, así como el tipo de suelo en que se apoyan. En cuanto a SCT lo único que tiene en común con TLHD y TLHB es que también se encuentra a una cierta distancia de una construcción. Por el contrario la estación CDAO se localiza en el interior de un edificio y aunque su base no está ligada al sistema de piso de este último, se considera que la presencia de la estructura es la causa de la atenuación en prácticamente todo el

rango de frecuencias de las señales registradas en dicha estación, como se observa en la fig. 6.19.

De 3.5 a 20 Hz las FT de las estaciones TLHB y TLHD tienen un comportamiento similar en relación a que ambas descienden después de alcanzar sus respectivos máximos, y las diferencias en cuanto a las amplitudes de las respectivas FT tal vez se asocien a las características de las estratigrafías correspondientes. El efecto de la estratigrafía en las funciones de impedancia ha sido mostrado en las refs (23 y 28).

En lo que se refiere a la FT de SCT en el mismo rango de frecuencias su comportamiento probablemente se asocie con la presencia de la construcción masiva que se encuentra en su vecindad (ref 27).

De 0.3 a 1 Hz el comportamiento de las FT para las estaciones SCT, TLHD y TLHB también se asocia a sus estratigrafías; en particular las Vs de SCT y TLHB son muy similares de 0 a 30 m, en tanto que la de TLHD es diferente de las anteriores.

Las FT para la componente EO se muestran en la fig. 6.20, el comportamiento general de las FT es muy similar al de las FT en la componente NS, con ligeras variaciones en relación a los rangos de frecuencias en que se aplicarían los comentarios; se considera que las posibles causas de ese comportamiento son las señaladas para las FT de la componente NS por lo cual no se repetirán aquí.

Finalmente en la fig. 6.21 se presentan las FT para la componente vertical. En este caso el comportamiento de las FT para las cuatro estaciones es muy similar en todo el rango de frecuencias considerado (0.3 a 20 Hz). Las FT adoptan valores inferiores a los de las componentes horizontales, máximos de 2.5 y mínimos de 0.6, excepto para el rango de 0.3 a 0.5 Hz y en 20 Hz en los que se observan valores de FT de hasta 3.5 y 0.3, sin embargo los promedios son del orden de 1.5 y 0.85. Nótese que las FT de TLHB y TLHD tienen un comportamiento muy diferente, a un máximo de una corresponde un mínimo de la otra, esto probablemente se asocia a las estratigrafías respectivas como fue señalado previamente para las componentes horizontales.

#### 6.6 Comparación de las funciones de transferencia teórica y experimental de la estación Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Las diferencias que se tienen entre las FT teórica (fig. 5.12) y experimental (figs. 6.4 a 6.9) de la estación SCT se manifiestan para frecuencias mayores de 1 Hz, ya que a partir de ésta frecuencia, la FT teórica adopta valores menores que uno hasta alcanzar un mínimo de 0.6 en 10 Hz, mientras que las FT

experimentales tienen valores mayores que uno para el mismo rango, y en 10 Hz alcanzan un valor de 5. De 10 a 30 Hz la FT teórica incrementa su valor hasta alcanzar un máximo de 2.3 en 27 Hz. Para el mismo rango de frecuencias las FT experimentales continúan incrementando su valor hasta un máximo de 12 y 9 para 18 Hz, en las direcciones EO y NS respectivamente; a partir de esa frecuencia disminuyen su valor hasta 2.5 en 30 Hz.

Una posible explicación de los comportamientos de las FT sería la siguiente:

La función de transferencia que se obtuvo en el capítulo 5 se basa en hipótesis que difieren apreciablemente de la realidad, por ejemplo la idealización de la estratigrafía del sitio por un semiespacio elástico con propiedades dinámicas obtenidas de las correspondientes a los primeros 30 m de profundidad de dicha estratigrafía.

Otro aspecto que no toma en cuenta dicha función de transferencia, es que la base del acelerógrafo se encuentra a una distancia de 6 m (en la dirección E-O) de una construcción con una masa mucho mayor que la de la base (ref. 27). Estudios recientes (refs. 23, 27, 28 y 29) han mostrado la importancia de ambos aspectos. Por último se tienen incertidumbres importantes implícitas en las propiedades dinámicas que hasta la fecha han sido obtenidas para el sitio de interés (cap. 2).

Tomando en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior y dado que la FT experimental se obtuvo de la excitación ambiental del sistema suelo-base de interés, se puede afirmar que dicha FT incorpora de una manera natural los aspectos que la FI teórica utilizada en este trabajo no incluye, de ahí las diferencias entre ambas FT. Probablemente mediante una modelización ad-hoc del caso que nos ocupa conduciría a FT teóricas más cercanas a las experimentales.

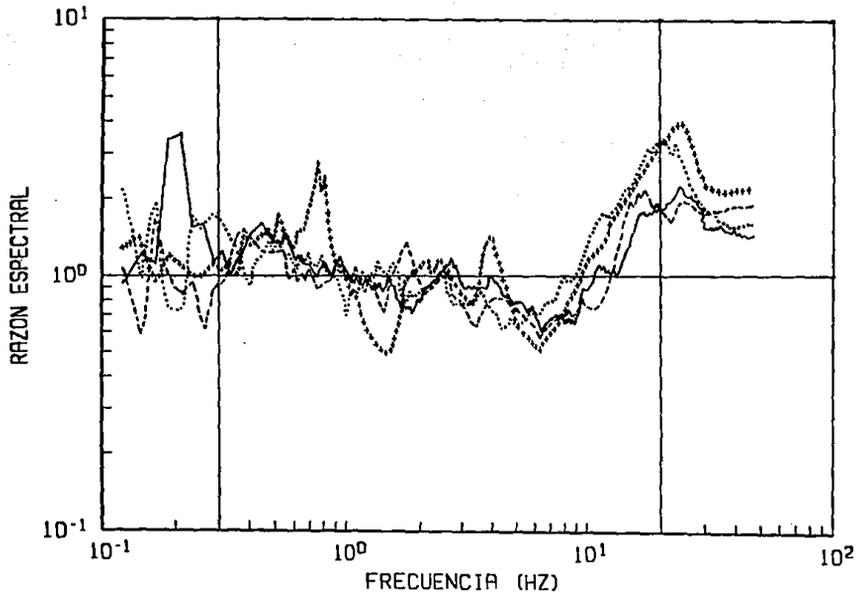


Fig 6.1 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 001 (++++), 002 (....), 003 (----) y 004 (—). Componente vertical, ERA CDAO.

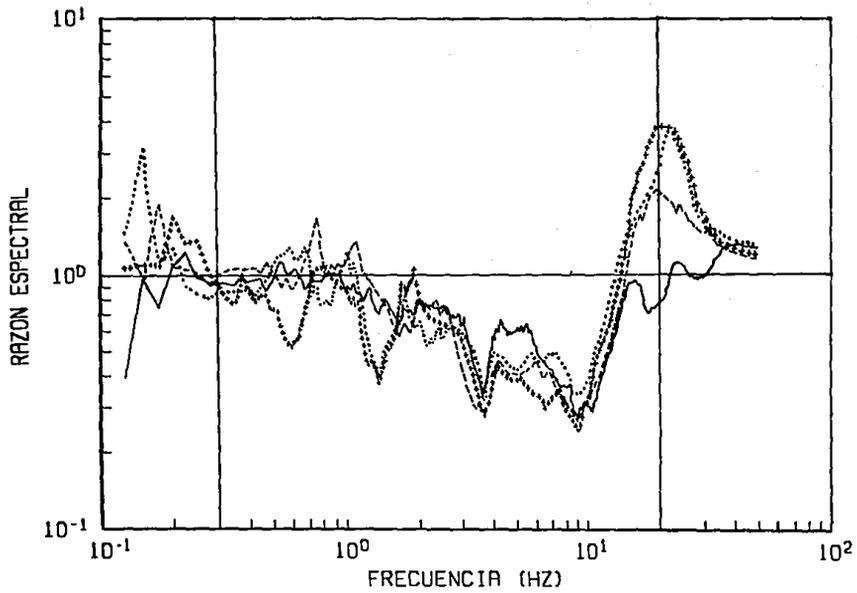


Fig 6.2 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 001 (++++), 002 (....), 003 (----) y 004 (—). Componente N-S, ERA CDAO.

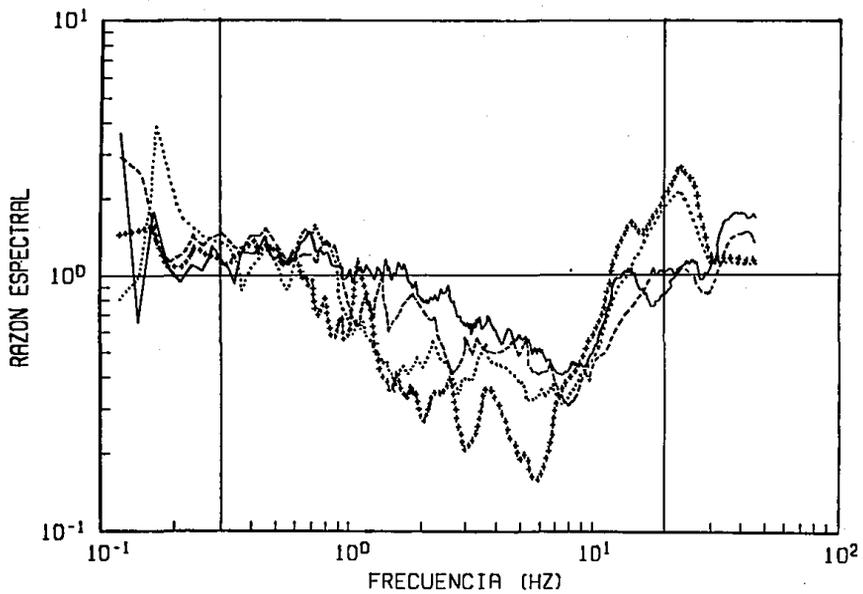


Fig 6.3 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 001 (++++), 002 (.....), 003 (----) y 004 (—). Componente E-0, ERA CDAO.

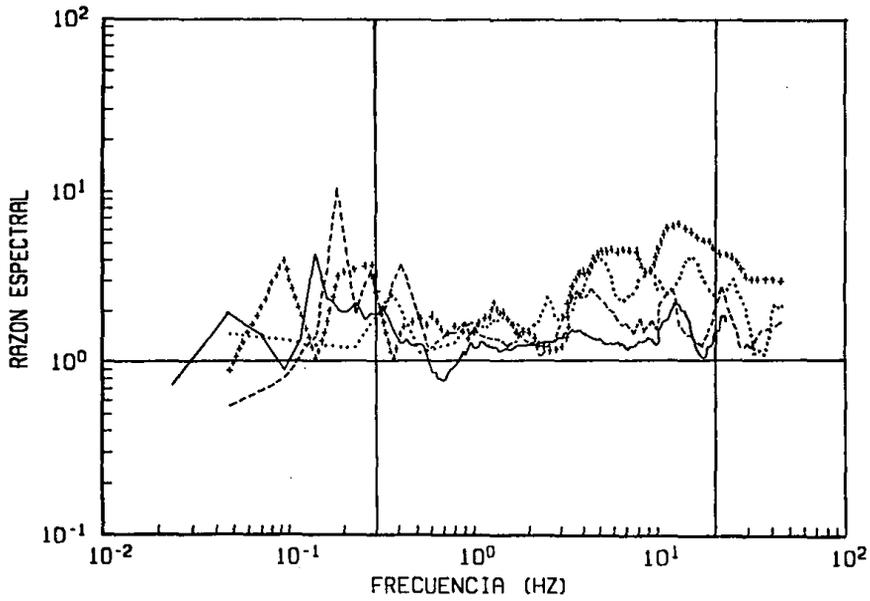


Fig 6.4 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 001 (++++), 002 (....), 003 (----) y 004 (—). Componente vertical, ERA SCT.

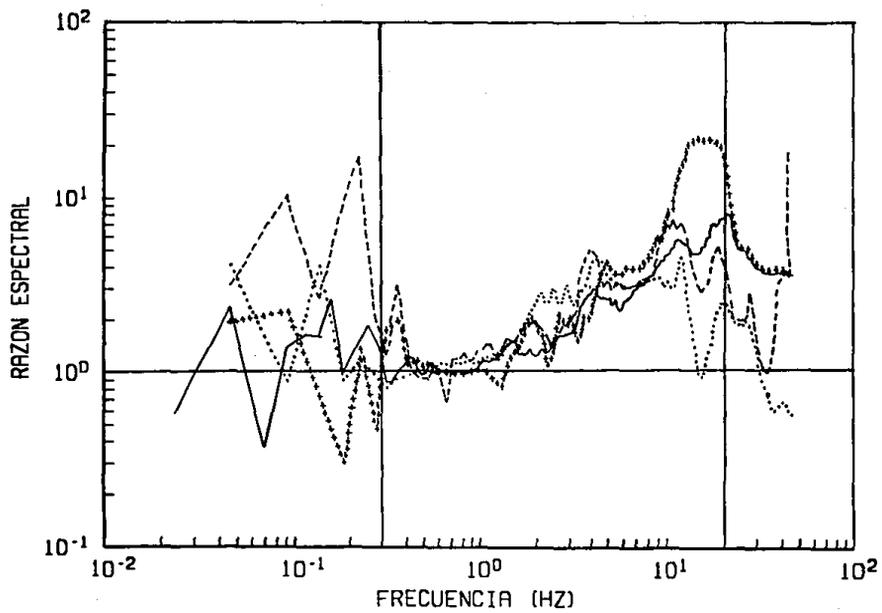


Fig 6.5 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 001 (++++), 002 (....), 003 (-----) y 004 (—). Componente N-S, ERA SCT.

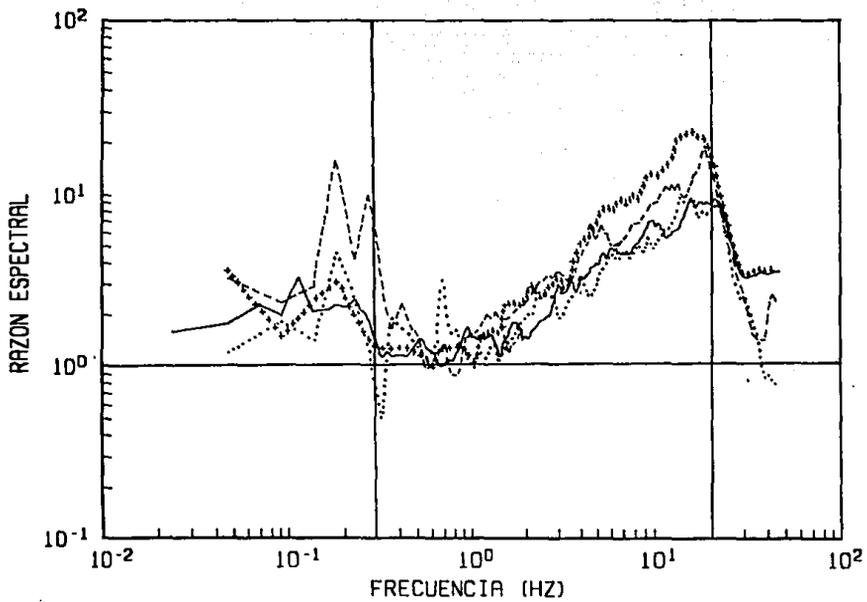


Fig 6.6 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 001 (++++), 002 (....), 003 (----) y 004 (—). Componente E-0, ERA SCT.

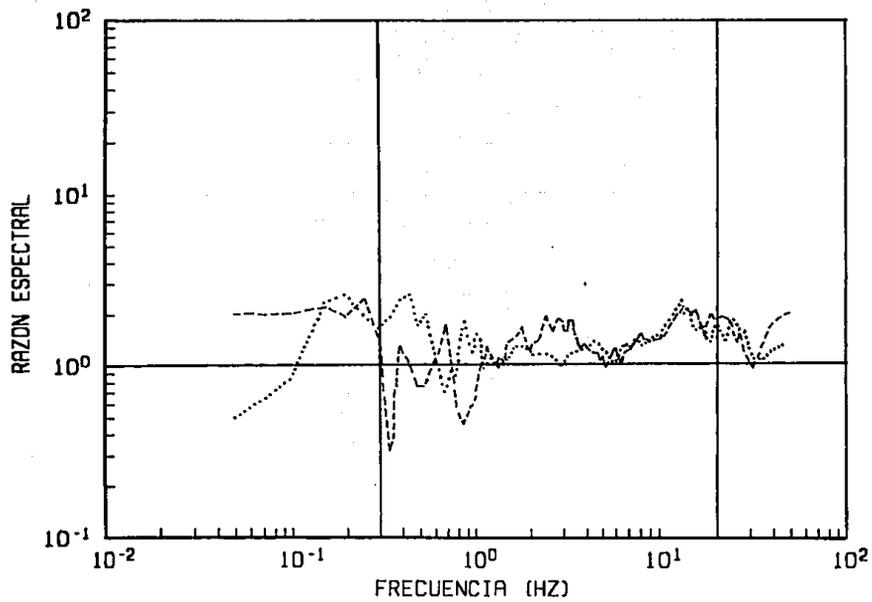


Fig 6.7 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 006 (....) y 007 (----).  
Componente vertical, ERA SCT.

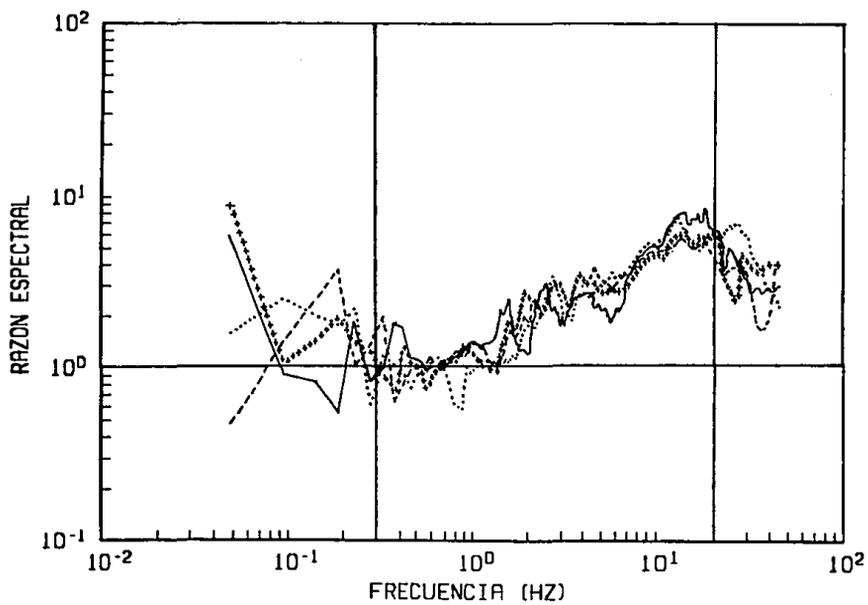


Fig 6.8 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 005 (++++), 006 (....), 007 (----) y 008 (—). Componente N-S, ERA SCT.

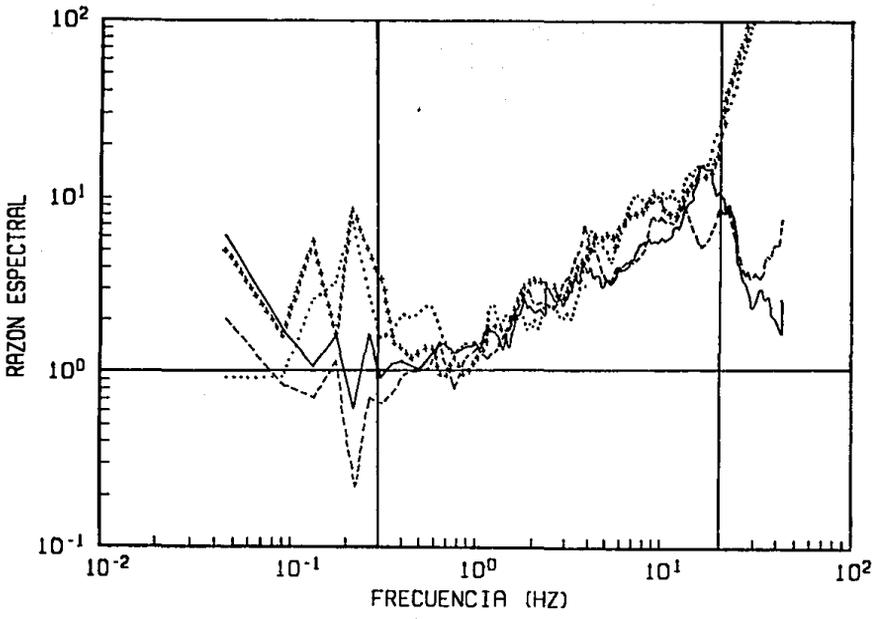


Fig 6.9 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 005 (++++), 006 (.....), 007 (----) y 008 (—). Componente E-O, ERA SCT.

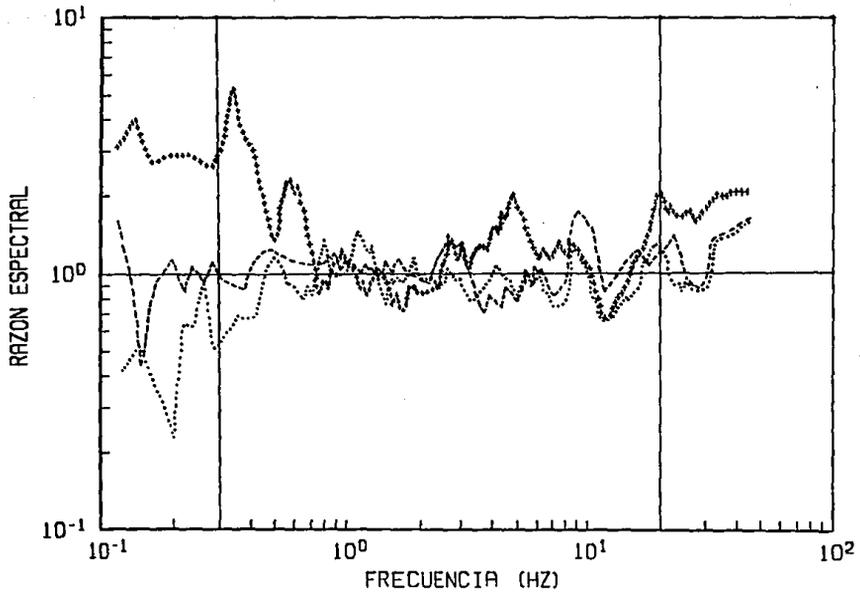


Fig 6.10 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 005 (++++), 006 (....), 007 (----). Componente vertical, ERA TLHB.

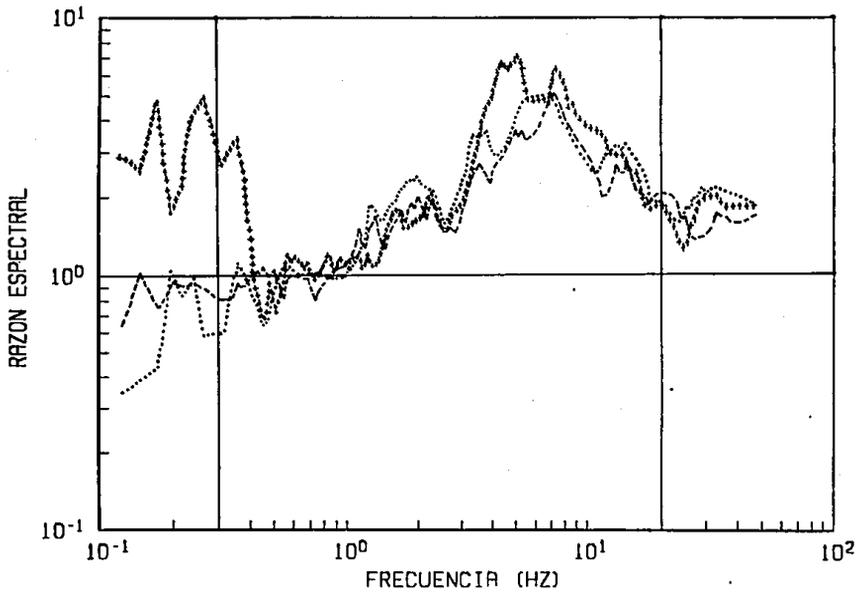


Fig 6.11 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 005 (+++), 006 (....) y 007 (----). Componente N-S, ERA TLHB.

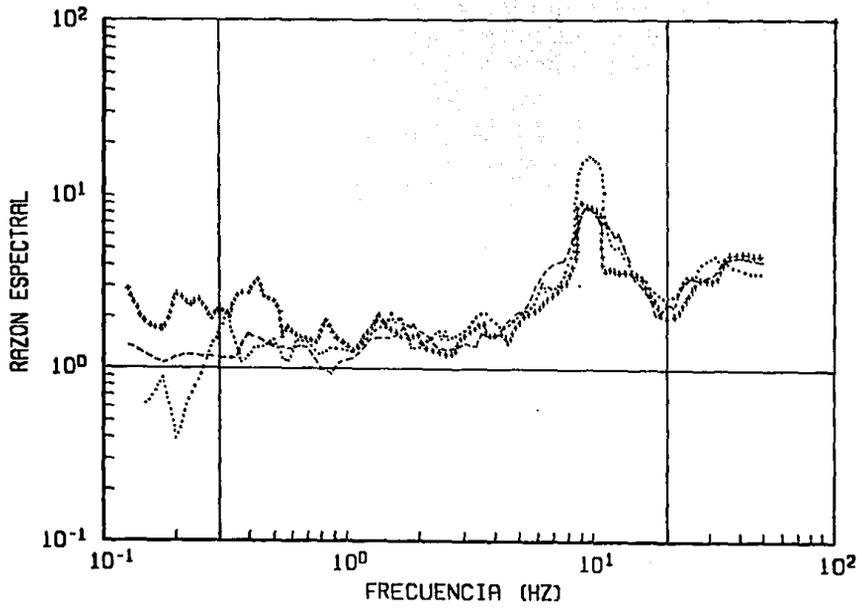


Fig 6.12 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 005 (++++), 006 (.....) y 007 (----). Componente E-0, ERA TLHB.

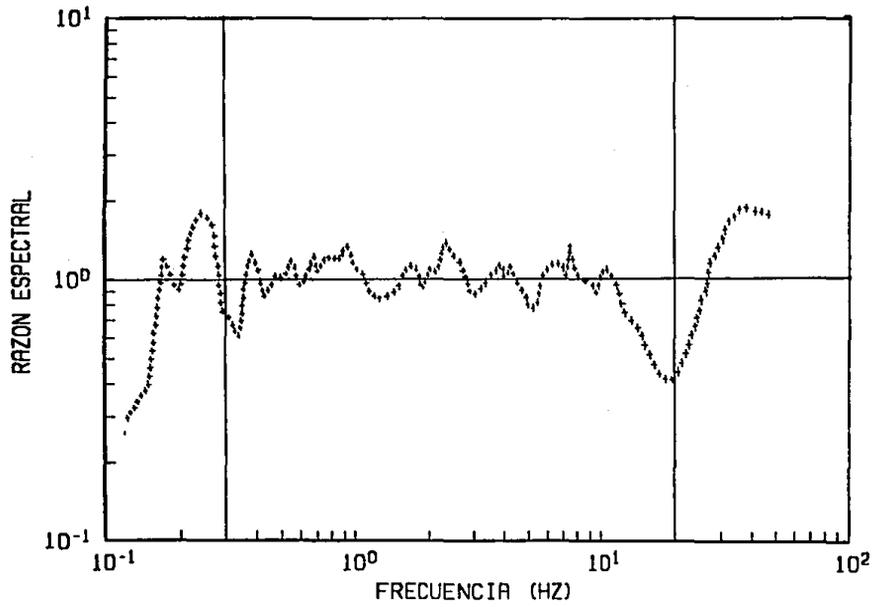


Fig 6.13 Función de Transferencia correspondiente al sitio 004 (++++).  
Componente vertical, ERA TLID.

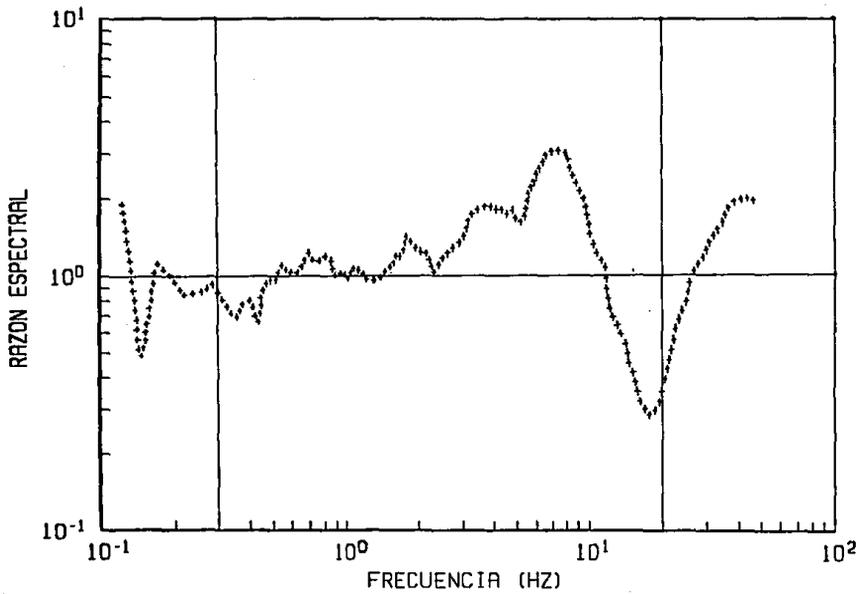


Fig 6.14 Función de Transferencia correspondiente al sitio 004 (+++).  
Componente N-S, ERA TLHD.

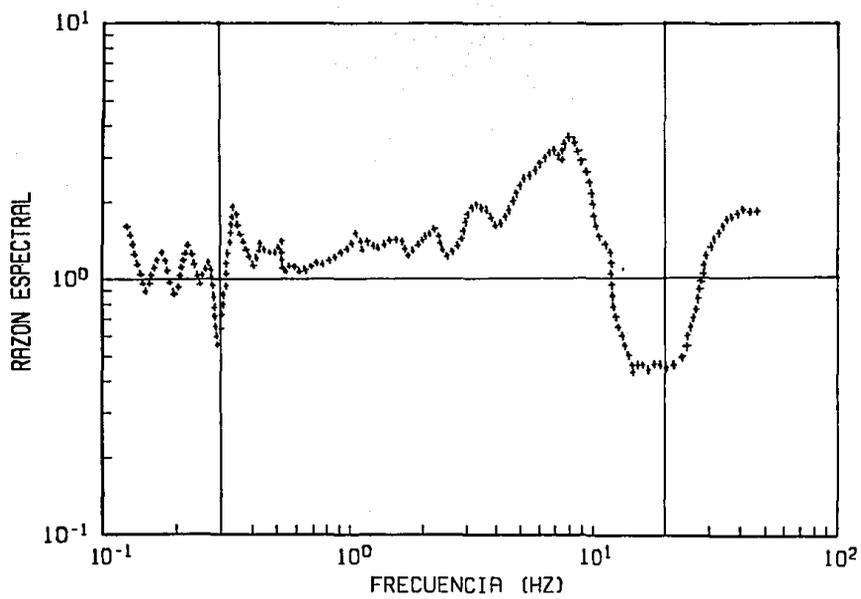


Fig 6.15 Función de Transferencia correspondiente al sitio 004 (++++).  
Componente E-0, ERA TLHD.

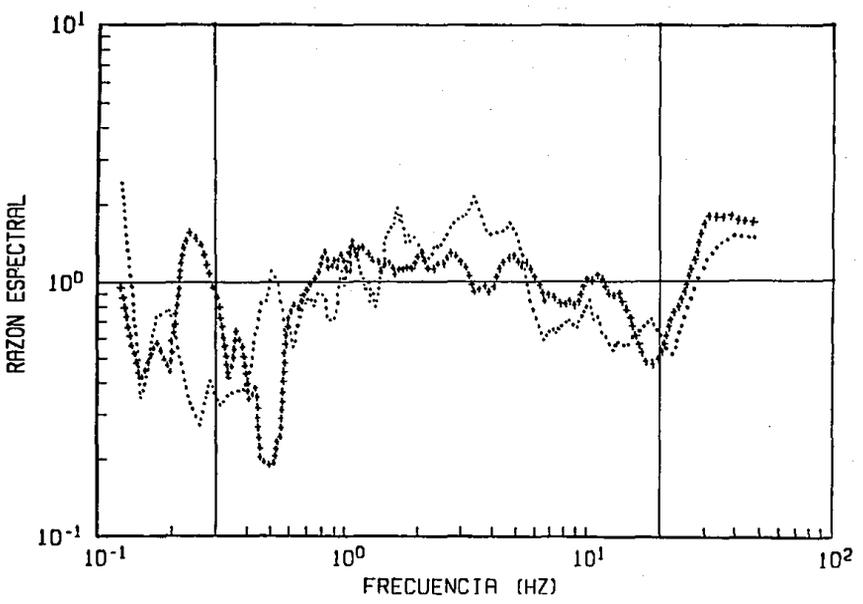


Fig 6.16 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 005 (+++) y 006 (....).  
Componente vertical, ERA TLID.

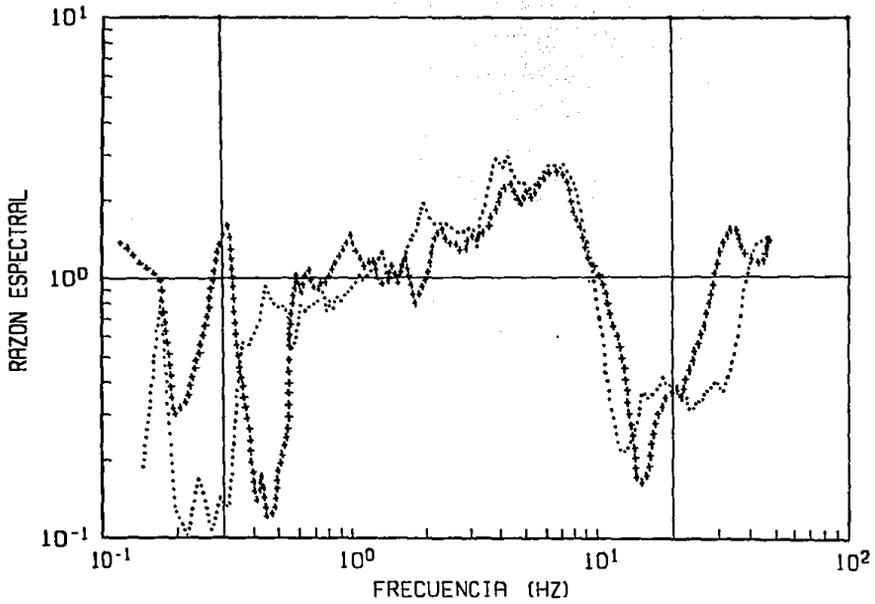


Fig 6.17 Función de Transferencia correspondiente a los sitios 005 (+++) y 006 (....).  
Componente N-S, ERA TLHD.

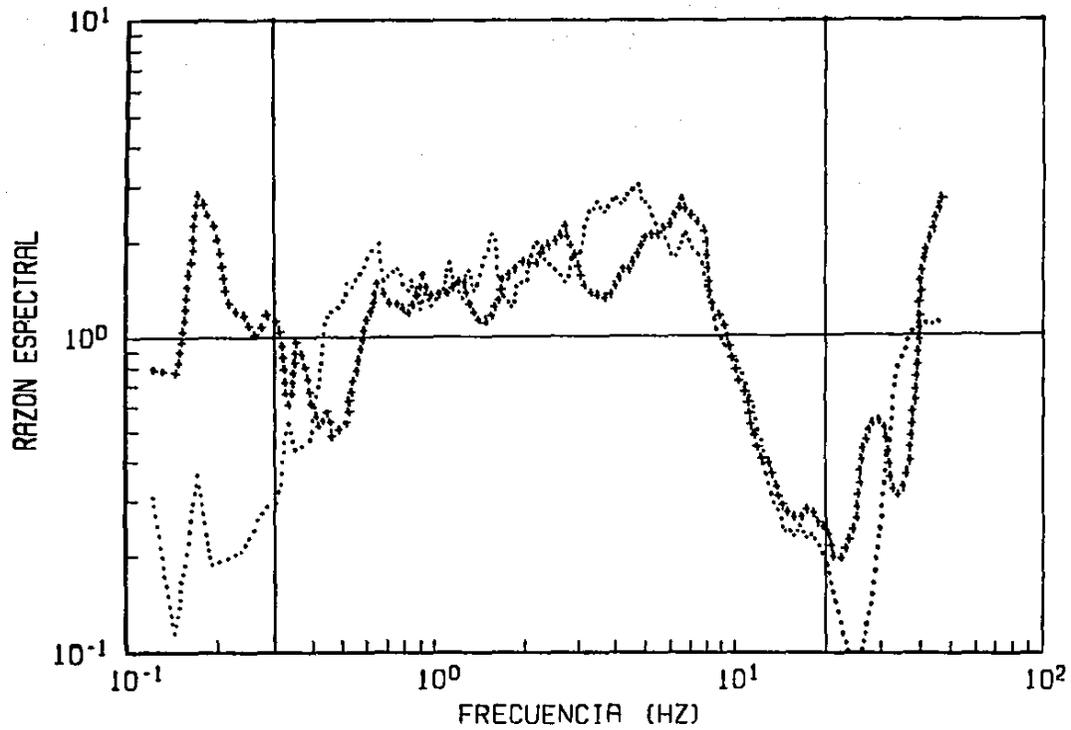


Fig 6.18. Función de Transferencia correspondiente a los sitios 005 (++++) y 006 (....).  
Componente E-0, ERA TLHD.

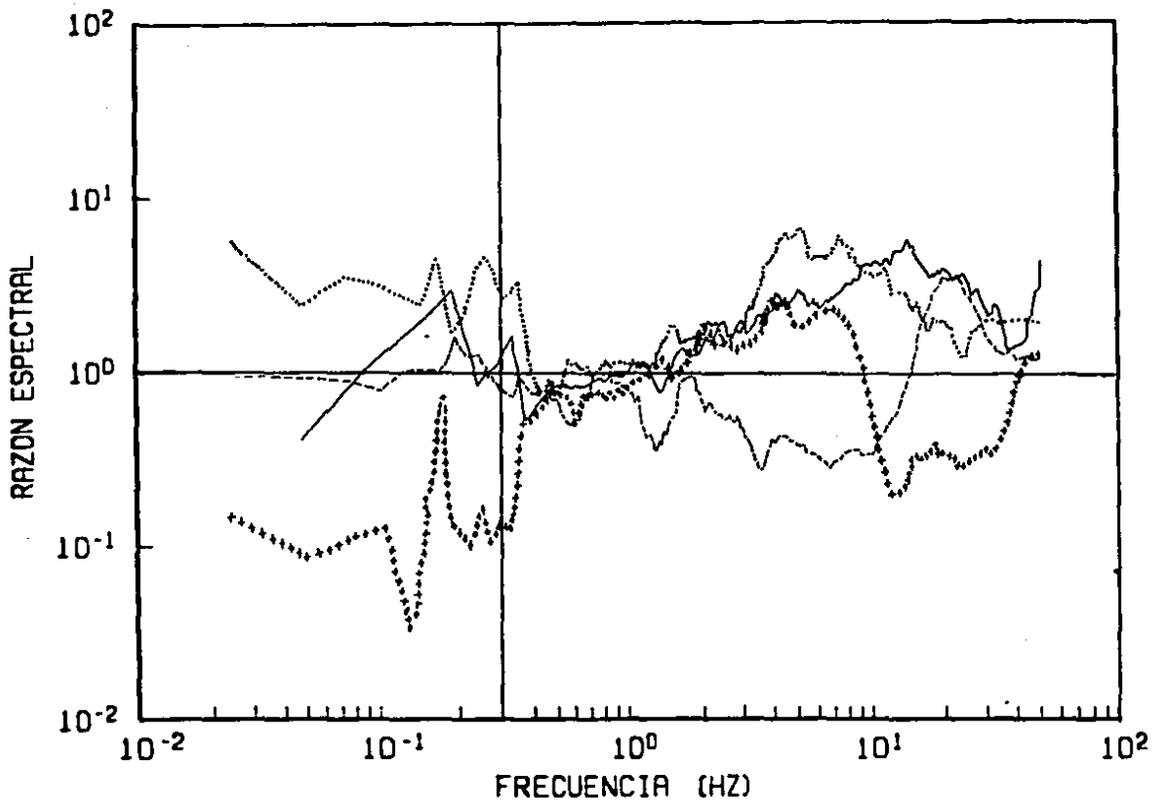


Fig 6.19 Funciones de Transferencia de los componentes N-S en las estaciones: CDAO (----), SCT (—), TLHB (....) y TLHD (++++) para los sitios 1, 7, 5 y 6 respectivamente.

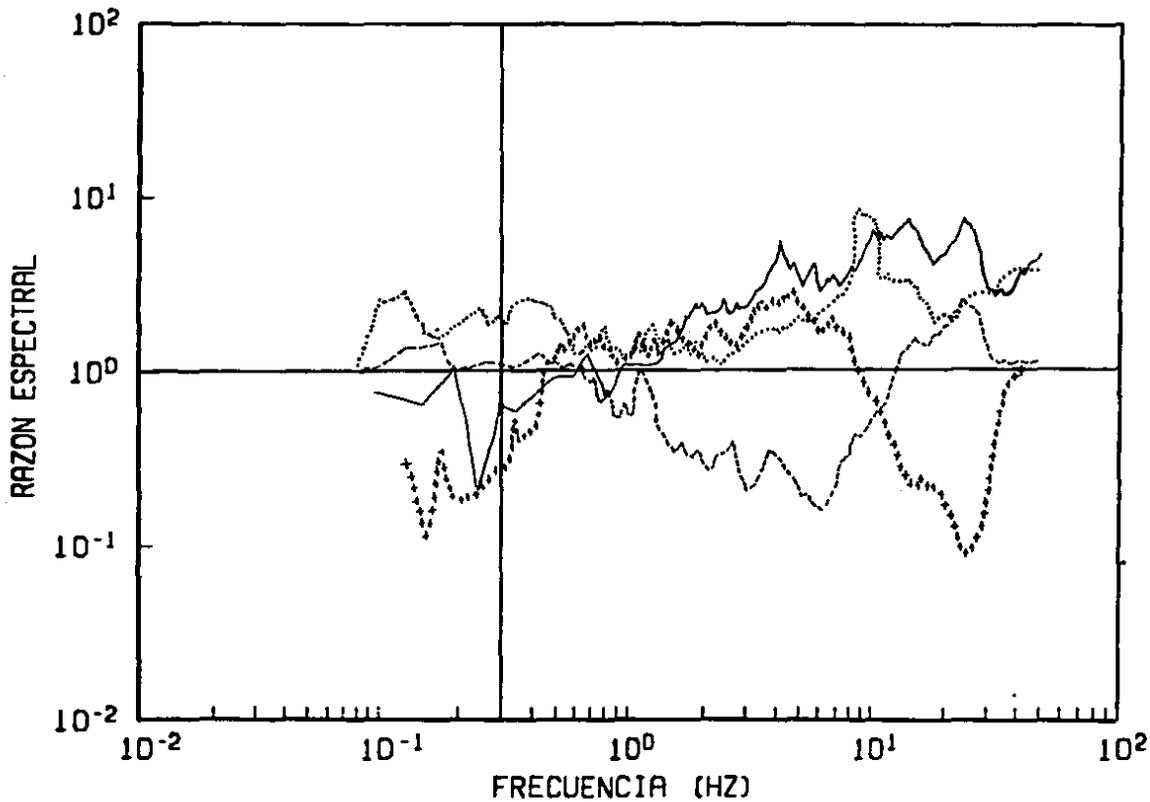


Fig 6.20 Funciones de Transferencia de los componentes E-0 en las estaciones: CDAO (-----), SCT (—), TLHB (....) y TLHD (++++) para los sitios 1, 7, 5 y 6 respectivamente.

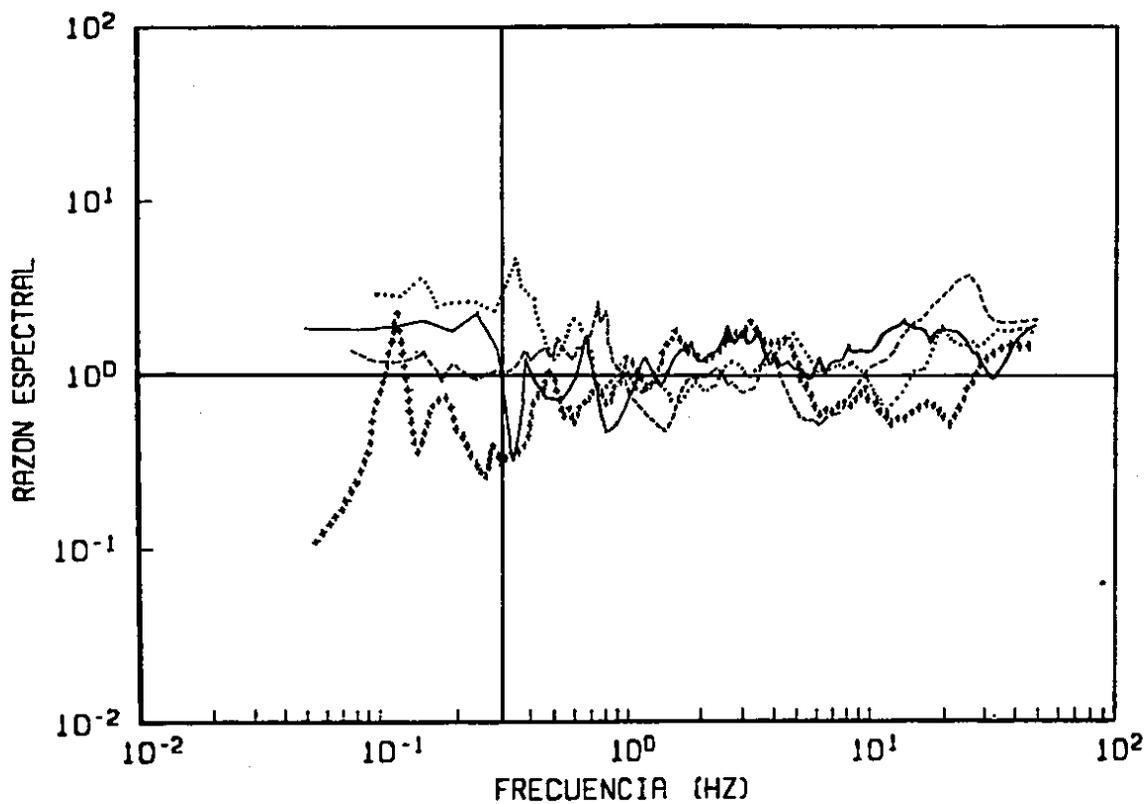


Fig 6.21 Funciones de Transferencia de los componentes VERT en las estaciones: CDAO (----), SCT (—), TLHB (....) y TLHD (++++) para los sitios 1, 7, 5 y 6 respectivamente.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados del estudio se puede concluir lo siguiente:

- a) La técnica de microtemblores se puede utilizar para estudiar los efectos de interacción suelo-estructura en estaciones acelerográficas.
- b) Existen efectos de interacción suelo-estructura en las cuatro estaciones acelerográficas incluidas en el estudio. En las estaciones SCT, TLHD y TLHB dichos efectos producen la amplificación de las componentes horizontales de las señales registradas en prácticamente toda la banda de frecuencias estudiadas (0.3 a 20 Hz), excepto en TLHD para la que también se observan deamplificaciones en las bandas de frecuencias de 0.3 a 0.5 y 10 a 20 Hz. En la estación CDAO los efectos de interacción suelo-estructura producen una deamplificación en las componentes horizontales de las señales registradas prácticamente para todo el rango de frecuencias.
- c) Las amplificaciones alcanzan hasta 12 veces en SCT para 20 Hz, 8 veces en TLHB para 5 Hz, 3 veces en TLHD para 5 Hz. Las deamplificaciones son de hasta 0.15 veces en TLHD para 20 Hz y 0.2 veces en CDAO para 6 Hz.

En cuanto a las componentes verticales, los efectos de interacción suelo-estructura en las estaciones de interés, producen amplificaciones y deamplificaciones promedio de 1.5 y 0.85, respectivamente para la banda de frecuencias estudiada.

- d) La función de transferencia teórica utilizada para estudiar los efectos de interacción suelo-estructura en la estación SCT no proporciona resultados satisfactorios. Dicha función se obtuvo de considerar una base rígida enterrada parcialmente en un semiespacio-elástico con propiedades promedio de los primeros 30 m de la estratigrafía del sitio. Por lo tanto no se recomienda el uso de este tipo de idealización para suelos del tipo de los que se tienen en la estación SCT.

## APENDICE A

### PRUEBAS DE LABORATORIO Y DE CAMPO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DINAMICAS DE LOS SUELOS.

En éste apéndice se describen en forma resumida las principales características de las pruebas de laboratorio y de campo utilizadas para determinar el módulo de cortante, el porcentaje de amortiguamiento y la velocidad de propagación de ondas de cortante.

#### Pruebas de Laboratorio

Triaxial cíclica. Consiste en la colocación de una muestra de suelo en la cámara triaxial, la que es consolidada a la relación de esfuerzos principales que se desee para posteriormente aplicar una deformación axial cíclica o un esfuerzo desviador cíclico, dependiendo de como se pretenda ejecutar la prueba (deformación controlada o esfuerzo controlado). La aplicación de esfuerzo o deformación se realiza por medio de una forma de onda conocida (p.e. senoidal). Esta prueba induce deformaciones en la muestra mayores de 10-2% (tabla 2.1).

En realidad esta es una forma indirecta de determinar el valor de G puesto que lo que se obtiene son valores de esfuerzo normal contra deformación axial. De aquí se determina un módulo secante dinámico de Young el cual introducido a la expresión:

$$G = \frac{E}{2(1 + u)}$$

donde:

- G = Módulo de rigidez al cortante
- E = Módulo secante dinámico de Young
- u = Relación de Poisson (para arcillas saturadas es aproximadamente 0.5)

permite determinar el valor de G, cabe aclarar que la utilización de ella está bajo la hipótesis de que el material tiene un

comportamiento elástico no-lineal para valores de esfuerzo desviador cercanos al 70% de la resistencia en condiciones estáticas (ref. 12).

Corte simple cíclico. A una muestra cilíndrica de suelo confinada mediante un resorte plano o un recipiente de paredes móviles, se le aplica un esfuerzo vertical hasta que se consolida, posteriormente se le induce una fuerza cortante cíclica por medio de un gato hidráulico (ref. 13), se miden los valores de la fuerza cortante y el desplazamiento, con lo cual se pueden determinar los valores de G y D. Esta prueba al igual que la triaxial cíclica induce deformaciones angulares mayores al  $10^{-2}$  (ver tabla 2.1).

Columna resonante. La prueba se basa en la teoría de propagación de ondas a través de barras prismáticas. El objetivo es hacer entrar en resonancia al espécimen ajustando el aparato a la frecuencia de excitación requerida, de tal modo que conociendo la frecuencia de resonancia y las propiedades geométricas del espécimen se puede determinar el valor de G (ref. 7).

Los resultados de las pruebas fueron obtenidos utilizando un dispositivo tipo Drnevich (ref. 7) que consta de una cámara en la cual es colocada la muestra, la parte superior es fijada a una placa que posee en sus extremos dos imanes introducidos en una bobina. A través de ella se hace pasar un voltaje variable con una forma de onda triangular, senoidal u otra. Este efecto produce un campo magnético que provoca un desplazamiento de los imanes, generando un momento torsionante cíclico en la muestra. En la placa existe un acelerómetro que registra la aceleración a que es sometido el espécimen. La deformación angular se obtiene con la expresión:

$$\gamma = \frac{RA_{max}}{f^2}$$

donde:

- R = Cte. que es función de la altura y diámetro de la muestra.
- $A_{max}$  = Aceleración máxima (registrada por el acelerómetro)
- $f^2$  = Frecuencia de oscilación en cps

En este método son importantes las condiciones de frontera que tenga el espécimen, para hacerlo entrar en resonancia, se distinguen 3 casos:

Condición de extremos

Expresión

Libres o empotrados

$$w_n = \frac{n\pi}{L} c$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

Uno empotrado y el otro libre

$$w_n = \frac{n\pi}{2L} c$$

$$n = 1, 3, 5, \dots$$

Uno empotrado y el otro  
con peso  $w_m$

$$\frac{w_n L}{c} \tan \frac{w_n L}{c} = \frac{w_b}{w_m} \circ \frac{I_b}{I_m}$$

$w_n$  = Frecuencia circular del modo de  
vibración (rad/s)

$n$  = Modo de vibración

$L$  = Longitud de la barra

$c$  = Velocidad de la onda generada ( $c=V_s$  para  
ondas de cortante  $c=V_p$  ondas longitudinales)

$w_b$  = Peso de la barra

$I_b$  = Momento polar de inercia de la barra

$I_m$  = Momento polar de inercia del peso sujeto a la barra

Teniendo los valores  $V_p$  y  $V_s$  se pueden obtener los valores de  $G$  y  $E$   
con las expresiones:

$$E = P V_p^2$$

$$G = P V_s^2$$

$$P = W/g$$

donde:

W = Peso volumétrico de la muestra, g = Aceleración de la gravedad

### Pruebas de Campo

Se basan en la generación de un tren de ondas (producidas por una fuente en base a explosiones, impactos, excitadores, etc.) y en el registro de éstas en campo, con la finalidad de obtener las velocidades de propagación de ondas en el suelo (ref. 7).

Las ondas que se transmiten en los suelos, en forma general son: ondas de cuerpo y superficiales.

Ondas de cuerpo. Las hay de compresión (P) y de corte (S), las primeras son generadas por movimientos de dilatación y compresión de las partículas en la dirección de su propagación.

Ondas superficiales. Las mas utilizadas son las Rayleigh (R) y las de love (L) en donde las partículas se desplazan en dirección perpendicular a su movimiento. La figura A-1 muestra los tipos de onda arriba señalados, además presenta la relación existente entre la velocidad de onda (P, S, R ó L) con los módulos dinámicos de cortante G y de Young E.

Los métodos mas usuales para la determinación de la velocidad de propagación de ondas en la masa del suelo son el de refracción y pruebas en pozos, estos se describen a continuación puesto que son de los que se posee la información a utilizar en este trabajo.

Refracción. Una onda al viajar de un estrato de suelo y llegar a otro sufre refracción o reflexión, en la primera al transmitirse la onda a otro estrato de densidad diferente cambia de dirección, en el segundo la onda rebota y regresa al medio de origen con un cierto ángulo.

En este método las ondas son generadas por impactos de un martillo o una masa sobre una placa colocada en la superficie del terreno, otro medio es en base a explosivos colocados a muy poca profundidad.

Mediante el tendido de una línea de geófonos separados entre si, se

capta el tiempo de llegada del tren de ondas a cada geófono. Conocida además la distancia de estos a la fuente generadora se obtienen gráficas democrónicas (fig. A-2), el valor de la velocidad de P se determina calculando el recíproco de las pendientes de las rectas.

La velocidad de la onda de cortante, S puede ser determinada mediante la utilización de geófonos que capten la onda en una sola dirección. Los geófonos además de ser colocados sobre la línea de prospección deberán de estar orientados en dirección perpendicular a dicha línea. En uno de sus extremos se realiza una excavación y con un martillo se golpea sobre una placa metálica, colocada en una cara de la excavación que sea perpendicular a la línea de prospección. De esta forma de generan ondas polarizadas de cortante horizontales, SH. Con los datos de tiempo-distancia se obtienen las curvas democrónicas, el valor de la velocidad de la onda de cortante se determina como el recíproco de las pendientes de las rectas.

Pruebas en pozos. Las mas usuales son down hole, up hole, cross hole y sonda suspendida, (fig. A-3).

Cross-hole. Se necesitan dos pozos, en uno se genera la excitación y en el otro se registra el tiempo requerido para que la onda llegue a el.

Down-hole. Se necesita un solo pozo, la onda se genera en el pozo y el registro se realiza en la superficie.

Up-hole. El registro se realiza en el pozo y la onda es generada desde la superficie, requiere solo un pozo.

Sonda suspendida. La fuente generadora es un martillo solenoide contenido en una sonda, la que es introducida en un pozo (lleno con fluido de perforación). Al activar el martillo se produce en el líquido una fuerza perpendicular al eje longitudinal del sondeo, haciendo que la fuerza se transmita del líquido a las paredes del pozo. El registro se realiza por medio de geófonos colocados a lo largo de la sonda.

Es importante mencionar que los métodos de laboratorio y campo mencionados están en función de la amplitud de la deformación inducida (véase fig. 2.1) por lo que será necesario complementar los resultados de unos con otros para cubrir el rango de deformaciones deseado.

A. Ondas de cuerpo

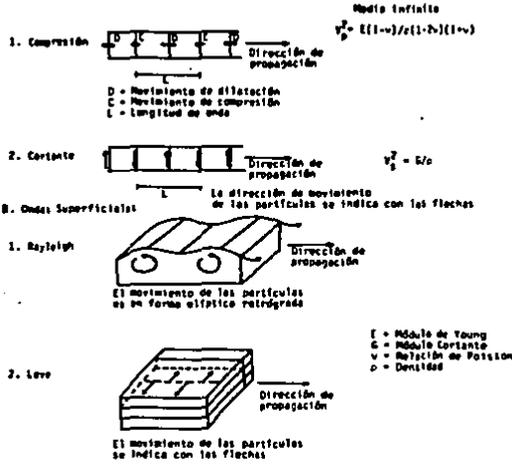


Fig. A-1 Ondas de cuerpo y superficiales (Movimiento de partículas y dirección de propagación).

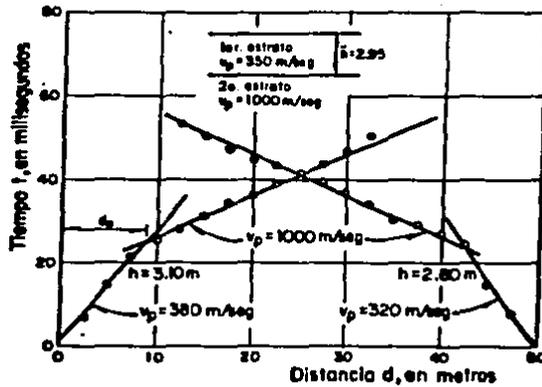


Fig. A-2 Curvas democrónicas. (ref. 7)

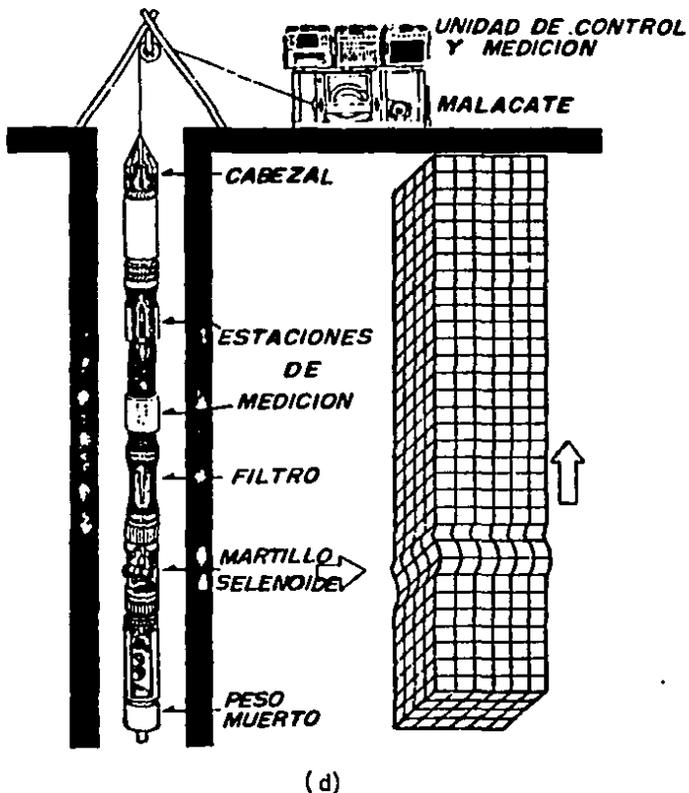
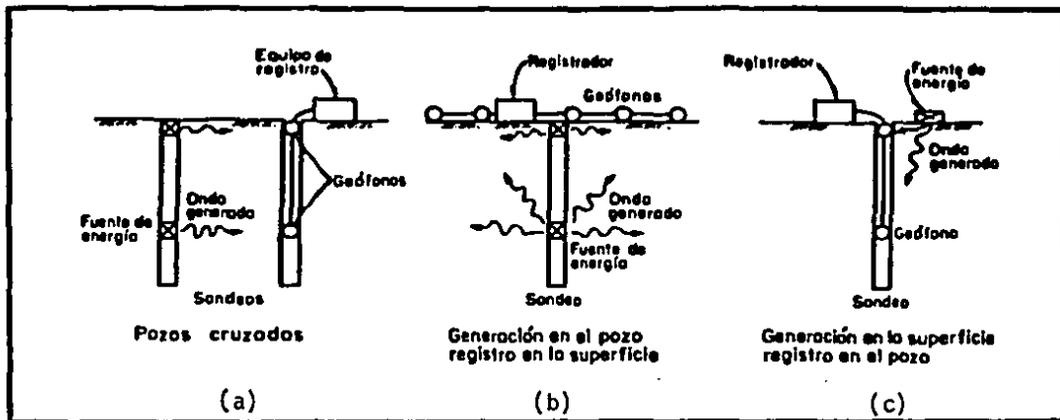


Fig. A-3 Métodos de campo para determinar propiedades dinámicas en suelos. (ref. 7)

a) Cross Hole	b) Up Hole
c) Down Hole	d) Sonda suspendida

## REFERENCIAS

1. Bolt B. A., "Nuclear Explosions and Earthquakes", W. LL. Freeman and Company, 1976.
2. Rascón O., Chávez M., Alonso L., Palencia V., "Registros y espectros de temblores en las ciudades de México y Acapulco 1961-1968", No. 385, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1977.
3. Mena E., C. Carmona, R. Delgado, L. Alcántara, O. Domínguez "Catálogo de acelerogramas procesados del sismo del 19 de septiembre de 1985. Parte I: Ciudad de México", No. 497, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1986.
4. Mena, E., S. K. Singh, R. Castro. "Aspectos de las características de la fuente y amplificación del movimiento en la ciudad de México durante el temblor del 19 de septiembre de 1985", Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Querétaro, 1987.
5. Reséndiz D., "Problemas geotécnicos de la ingeniería sísmica", Revista Ciencia, 38, pp. 17-28. México, 1987.
6. Marsal R., y Mazari M., "El subsuelo de la ciudad de México", Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1969.
7. Jaime A. "Características dinámicas de la arcilla del valle de México", Tesis Doctoral, DEPFI, UNAM, México, 1987.
8. García M. "Efectos de la carga cíclica en muestras isotrópicamente consolidadas de la ciudad de México", Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, México, 1987.
9. Jaime A., et al, "Características del suelo en el sitio SCT", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1987.
10. Jaime A., et al, "Características del suelo en el sitio central de abastos oficina", Instituto Ingeniería, UNAM, México, 1987.
11. Jaime A., et al, "Características del suelo en el sitio Tláhuac Deportivo", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1987.
12. Díaz A., y Córdoba G., "Resistencia de la arcilla de la ciudad de México bajo cargas cíclicas". Memorias del Simposio "Los sismos de 1985; casos de Mecánica de suelos", SMMS, México, 1986.
13. Jaime A., et al, "Aparato de corte simple cíclico", Publicación No. 508, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1987.

14. Crouse C.B., et al. "Amplification of earthquake motions recorded at an accelerograph station", VIII WCEE, vol 1.
15. Velasco J. M., et al. "El temblor de febrero 8, 1988 (Ms = 5.8). Registros obtenidos por la red acelerográfica de CFE.", Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico, 1988.
16. Kobayashi H., et al, "Measurement of microtremors in and around Mexico D. F.", Part 1, Institute of Technology Yokohama, Japan, 1986.
17. Kobayashi H., et al, "Estimated strong ground motions in the Mexico city due to the Michoacan, Mexico earthquake of sept. 19, 1985 based on characteristics of microtremor", Part 2, Institute of Technology Yokohama, Japan, 1986.
18. Lermo J. y Rodriguez M., "Zonificacion de Mexico, D.F., usando microtremores", Instituto de Ingenieria, UNAM, 1987.
19. Carmona C., E. Mena, R. Delgado, L. Alcantara, O. Dominguez "Catalogo de acelerogramas procesados del sismo del 19 de septiembre de 1985. Parte II. Replica del 21 de septiembre en la ciudad de Mexico", No. 503, Instituto de Ingenieria, UNAM, 1987.
20. Dominguez J. "Dynamic stiffness of rectangular foundations", Departamento de Ingenieria Civil, Reporte NUM. R78-20, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1967.
21. Gazetas G., J.L., Tassoulas, "Horizontal stiffness of arbitrarily shaped embedded foundations", J. ASCE, Geotechnical engineering, vol. 113, No. 5, 440-457, 1987.
22. Gazetas G., J.L., Tassoulas, "Horizontal damping of arbitrarily shaped embedded foundations", J. ASCE, Geotechnical engineering, vol. 113, No. 5, 458-475, 1987.
23. Hadjian A., E., Luco, "On the importance of layering on the impedance functions", 6th WCEE, New Delhi, pp. 1675-1681, 1977.
24. Werlde H., Waas G, "Dynamic stiffness of foundations on inhomogeneous soils", Procc. European Conference Earthquake Engeneering, vol. 2, Lisboa, 1986.
25. Apsel R., J., Luco, J. E., "Impedance functions for foundations embedded in a layered medium: an integral equation approach.", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 15, 213-231, 1987.
26. Romo M. P., Chen H. C., Lysmer J. y Seed H. B., " PLUSH: A

computer program for probabilistic finite element analysis of seismic soil-structure interaction", Report No. EERC 77-01, University of California, Berkeley, 1980.

27. Chavez M., D. Muria, O. Jimenez, "Estudio experimental utilizando acelerometros de los efectos de interaccion suelo estructura en la estacion SCT de registros de aceleracion del Idel", informe interno Idel, UNAM, 1989.
28. Luco J. E., H. L. Wong, "Seismic response of foundations embedded in a Layered half-space", EESD, vol 15, 233-247, 1987.
29. Lin H. T., J. A. Roesset, J. L. Tassoulas, "Dynamic interaccion between adjacent foundations", EESD, vol 15, 323-343, 1987.
30. Romo M. P., A. Jaime, "Caracteristicas dinamicas de las arcillas del valle de Mexico y analisis de la respuesta sismica del suelo", primera etapa, Idel, UNAM, reporte del proyecto 6504, 1986.
31. Faccioli E., D. Resendiz, "Soil Dynamics Behavior including liquefaction", Ch 4 in C. Lomnitz and E. Rosenbueh, Editors, Seismic Risk and Engineering Desicions, Elsevier, Amsterdam, 1976.
32. Lermo J., et al, "Efectos de interaccion suelo-estructura en las estaciones de registro de aceleracion del Instituto de Ingenieria, UNAM, localizadas en el D.F. (Estudio experimental en SCT)", Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico, 1988.
33. Chavez M., et al, "Efectos de interaccion suelo-estructura en las estaciones de registro de aceleracion del Instituto de Ingenieria, UNAM, localizadas en el D.F. (Estudio experimental en Central de Abasto Oficina)", Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico, 1988.
34. Alcantara L., et al, "Efectos de interaccion suelo-estructura en las estaciones de registro de aceleracion del Instituto de Ingenieria, UNAM, localizadas en el D.F. (Estudio experimental en Tlahuac Bombas)", Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico, 1988.
35. Chavez M., et al, "Efectos de interaccion suelo-estructura en las estaciones de registro de aceleracion del Instituto de Ingenieria, UNAM, localizadas en el D.F. (Estudio experimental en Tlahuac Deportivo)", Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico, 1988.