

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**AMPLIFICACION SISMICA EN  
ALGUNAS CIUDADES DEL PERU**

**TESIS**

**Para Optar el Título Profesional de  
Ingeniero Civil**

**OSCAR EFRAIN CHAVEZ FIGUEROA**

**Lima - Perú**

**1984**

Trabajo dedicado a mis padres,  
Eva y Oscar, en testimonio de  
mi profundo agradecimiento por  
que todo lo que soy y tengo se  
lo debo a ellos.

## AGRADECIMIENTO

Mi más sincero reconocimiento a la Ing. Wendy Taniwangsa de Chávez y al Dr. Ing<sup>o</sup> Jorge Alva Hurtado, asesores del presente trabajo y verdaderos escultores del mismo.

Al CERESIS (Centro Regional de Sismología para América del Sur) por el patrocinio de la Tesis, en especial a su Director el Ingeniero Alberto Giesecke Matto.

A CORDE-ANCASH por la ayuda prestada en la zona de su jurisdicción, especialmente los Ing<sup>os</sup>. Carlos Torrejón, Luis Heysen y Manuel Hermoza.

Al Comité de Ingeniería Antisísmica de la UNI, por proporcionar el equipo de Microtremor utilizado, en especial a su Presidente el Ing<sup>o</sup> Roberto Morales M. y a su Secretario el Ing<sup>o</sup> Juan Chávez Zegarra.

A la Oficina de Estudios Analíticos de ELECTROPERU, en especial al Ing<sup>o</sup> Arturo Albarracín Flores por la utilización del digitizador disponible.

A Jorge Meneses Loja por toda la ayuda prestada a lo largo del desarrollo del trabajo. También a Jorge Díaz, Abel Ordoñez y Hugo Barrón, participantes del proyecto SISRA-ECOSIS del CERESIS que colaboraron en la consecución del presente trabajo.

A todas las personas que de alguna forma ayudaron a hacer realidad esta Tesis, mi sincero reconocimiento.

## INDICE

	<u>Pág.</u>
RESUMEN	1
<u>CAPITULO I</u> INTRODUCCION	6
1.1 MICROTREPIDACIONES	8
1.2 DETERMINACION DEL PERIODO PREDOMINANTE POR MICROTREPIDACIONES.	9
1.3 DETERMINACION DEL PERIODO PREDOMINANTE POR AMPLIFICACION SISMICA.	11
<u>CAPITULO II</u> -    TEORIA DE MICROTREPIDACIONES	15
2.1 INTRODUCCION	15
2.2 SINTESIS HISTORICA	16
2.3 LA DISTRIBUCION DE PERIODOS DE MICROTREPIDACIONES	19
2.4 CLASIFICACION DEL TERRENO POR MICROTREPIDACIONES.	20
2.4.1. Primera propuesta de clasificación del terreno.	21
2.4.2. Segunda propuesta de clasificación del terreno.	21
2.4.3. Daños de sismos y tipos de clasificación del terreno por microtrepidaciones.	23
2.5 CONCLUSIONES	24
<u>CAPITULO III-</u> TEORIA DE PROPAGACION DE ONDAS UNIDIMENSIONALES CON DEFORMACIONES PEQUEÑAS.	29
3.1 INTRODUCCION	29

	<u>Pág.</u>
3.2 CARACTERISTICAS DINAMICAS DE LOS SUELOS.	30
3.2.1. Densidad de Masa o Peso Unitario.	31
3.2.2. Módulo de Corte	31
3.2.3. Amortiguamiento del Suelo	32
3.3 TEORIA DE AMPLIFICACION UNIDIMENSIONAL.	34
3.4 SIMPLIFICACION DE PERFILES DE SUELO.	37
3.4.1. Simplificación por Tipos de Suelo.	37
3.4.2. Simplificación por valor de N de Penetración Standard	38
3.4.3. Simplificación resultante de perfiles.	39
3.5 ANALISIS DINAMICO DE DEPOSITOS DE SUELOS COMO SISTEMA CONTINUO	41
3.5.1. Ecuación de Movimiento	41
3.5.2. Solución de la Ecuación de Movimiento para Depósitos de Suelos Estratificados.	44
<u>CAPITULO IV-</u> ESTUDIOS PRELIMINARES	50
4.1 REVISION DE TRABAJOS ANTERIORES	50
4.1.1. Introducción	50
4.1.2. Microzonificación de Chimbote-Misión Japonesa.	51
4.1.3. Microzonificación de Huaraz-Sub-comisión Técnica CRYRZA.	55
4.1.4. Investigaciones Recientes	57

	<u>Pág.</u>
4.2 DESCRIPCION DEL EQUIPO USADO	60
4.2.1 Sensores	60
4.2.2 Amplificador	61
4.2.3 Grabadora	61
4.2.4 Fuente de Energía	61
4.2.5 Miniwriter	62
4.2.6 Calibración	62
4.2.7 Medición	63
4.2.8 Equivalencia para Amplitudes	64
4.3 ANALISIS DE LA ONDA DE MICROTREPIDACIONES.	66
4.3.1 Digitación	66
4.3.2 Corrección de la línea base	69
4.3.3 Espectro de Frecuencia-Período (Método del cruce de la línea base y método pico)	70
4.3.4 Espectro de densidad de probabilidades	77
4.4 MICROTREPIDACIONES Y PREDICCIÓN DE PERIODOS EN LIMA.	84
4.4.1 Introducción	84
4.4.2 Microtrepidaciones	84
4.4.3 Amplificación Sísmica	85
4.4.4 Conclusiones	87
<u>CAPITULO V</u> ESTUDIO DE MICROTREPIDACIONES EN CIUDADES DEL DEPARTAMENTO DE ANCASH.	92
5.1 INTRODUCCION	92
5.2 ESTUDIO EN CHIMBOTE	94

	<u>Pág.</u>
5.2.1. Microtrepidaciones	94
5.2.2. Amplificación Sísmica	95
5.2.3. Conclusiones	96
5.3 ESTUDIO EN HUARAZ	103
5.3.1. Microtrepidaciones	103
5.3.2. Conclusiones	105
5.4 COMPARACION CON ESTUDIOS ANTERIORES	110
5.4.1. Introducción	110
5.4.2. Comparación en Chimbote	110
5.4.2.1 Comparación de resultados individuales en Chimbote.	113
5.4.3. Comparación en Huaraz	115
5.4.3.1 Comparación de resultados individuales en Huaraz.	117
5.4.4. Conclusiones	118
<u>CAPITULO VI</u> CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
6.1 CONCLUSIONES	121
6.2 RECOMENDACIONES	125
BIBLIOGRAFIA	149
<u>APENDICES</u>	
<u>APENDICE I</u> Ondas de microtrepidaciones obtenidas en las ciudades de Lima, Chimbote y Huaraz.	
<u>APENDICE II</u> Curvas Frecuencia-Período de microtrepidaciones obtenidas en Lima, Chimbote y Huaraz.	
<u>APENDICE III</u> Resultados de Simplificación de per	

files de suelo, datos de sondajes y espectros de amplificación obtenidos de la computadora para Lima y Chimbote.

APENDICE IV Programas de Cómputo utilizados en la reducción de datos de microtrepidaciones y en amplificación sísmica.

## RESUMEN

El trabajo documenta la metodología utilizada y presenta los resultados de ensayos de microtrepidaciones en las ciudades de Chimbote y Huaraz realizados como parte del proyecto SISRA-ECOSIS, patrocinado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur.

Se han realizado ensayos de microtrepidaciones complementarios a los efectuados por la Misión Japonesa en 1970 en Chimbote y por la Comisión de Reconstrucción y Rehabilitación de la Zona Afectada por el sismo del 31 de Mayo de 1970 (CRYRZA) en 1971 en Huaraz. Los ensayos de microtrepidaciones proporcionan períodos fundamentales y clasificación del suelo, que en conjunción con la Geología, Sismología, Geotecnia y Evaluación de daños de terremotos, proporcionan parámetros para realizar la microzonificación sísmica de una ciudad.

Además, en base a perforaciones geotécnicas existentes se ha podido modelar la estratigrafía del subsuelo como masa continua en algunas zonas de Chimbote y mediante el análisis de propagación unidimensional de ondas, predecir los períodos naturales del suelo. Se ha comprobado que existe bastante similitud entre los valores medidos del período natural mediante microtrepidaciones y los

valores predichos por el análisis de propagación de ondas con deformaciones pequeñas en puntos cercanos.

Se presenta la metodología utilizada en este estudio para la reducción de datos de los ensayos de microtrepidaciones y en el análisis unidimensional de propagación de ondas con deformaciones pequeñas. El equipo que ha sido utilizado en este trabajo para la medición de microtrepidaciones es el "Microtremor", donado por la Segunda Misión Japonesa al Perú en el campo de la Ingeniería Antisísmica en 1981.

Con el objeto de conocer y calibrar el equipo disponible se realizaron ensayos de microtrepidaciones en el área de Lima, determinándose los períodos predominantes con la metodología implementada. En los puntos medidos donde existía conocimiento de la estratigrafía se realizaron predicciones de períodos predominante mediante el análisis de propagación unidimensional de ondas. Dichos análisis se documentan.

Para elaborar el mapa de distribución de períodos en la ciudad de Chimbote se tuvieron en cuenta: los sondajes y microtrepidaciones de la Misión Japonesa, los sondajes realizados posteriormente y los resultados de ensa-

yos de microtrepidaciones realizados en este trabajo. De las microtrepidaciones, se hallaron los períodos predominantes, medios y mayores, así como la clasificación de suelos de Kanai aplicada a dichos resultados, en base a las curvas Frecuencia-Período. Para la aplicación de la teoría de propagación unidimensional de ondas, se usaron todas las perforaciones disponibles y se hallaron los períodos para los diferentes modos de vibración, siendo el primer modo, el que proporciona el período fundamental de vibración.

Todos los cálculos necesarios para las microtrepidaciones y amplificación sísmica realizados en el presente trabajo se realizaron con ayuda de la computadora, en el Centro de Cómputo de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde con anterioridad se implementaron los programas de cómputo necesarios. Dichos cálculos se documentan en este trabajo.

Combinando los resultados de mediciones y predicción de períodos predominantes, se elaboró un mapa de distribución de períodos en Chimbote. En base a todos resultados disponibles de microtrepidaciones, se presenta un mapa de clasificación de suelos de acuerdo a Kanai para dicha ciudad.

En base a la distribución de períodos en Chimbote se aprecian tres zonas diferenciadas: Zona Norte, con períodos predominantes de 0.1 a 0.25 seg., la Zona Centro de gran extensión con períodos predominantes de 0.3 seg. aproximadamente, y la Zona Sur con variación irregular de períodos predominantes.

En la ciudad de Huaraz, los elementos de juicio utilizados en la confección del mapa de distribución de períodos son los resultados de microtrepidaciones de CRYRZA en 1971 y los ejecutados por la UNI en este proyecto. No hubo estudios geotécnicos disponibles para realizar el análisis de propagación de ondas. Análogamente al trabajo en Chimbote, se hallaron los períodos predominante, medio y mayor y también la clasificación de suelos de Kanai. Con los resultados de microtrepidaciones se elaboró el mapa de distribución de períodos en Huaraz y también el mapa de clasificación de suelos de acuerdo a Kanai.

La distribución de períodos en el área urbana de Huaraz es irregular, teniendo marcadas diferencias en el centro de la ciudad con períodos que fluctúan entre 0.1 seg a 0.3 seg. En las Zonas Norte y Sur de la ciudad, la distribución de períodos es un tanto más uniforme, te

niendo la lógica discontinuidad de la zona aluviónica - del río Quilcay.

Se concluye de lo investigado en el presente trabajo, que la técnica presentada en la realización de ensayos de microtrepidaciones para ser utilizada en microzonificación sísmica es relativamente sencilla y de bajo costo; y al existir equipo y procedimiento de análisis disponibles en el país, es recomendable su utilización en otras ciudades del Perú.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

La microzonificación sísmica de una ciudad es un proceso multidisciplinario, que involucra la realización de estudios geológicos, estudios sismológicos, estudios geotécnicos, estudios hidrogeológicos, estudios de distribución de daños después de haber ocurrido un sismo y estudios de microtrepidaciones y análisis de amplificación sísmica.

Las propiedades dinámicas del subsuelo pueden determinarse por medio de mediciones de microtrepidaciones y a aquellas se verifican con análisis de amplificación sísmica con deformaciones pequeñas, de la roca basal a la superficie. El análisis de la onda de microtrepidaciones y la amplificación sísmica se realiza con la utilización de la computadora.

Las mediciones de microtrepidaciones son fáciles de ejecutar y se realizan rápidamente en todo momento y en cualquier lugar, sin necesidad de esperar la ocurrencia de un sismo. El estudio de las microtrepidaciones como un método de microzonificación sísmica se ha llevado a

cabo en varios países. En el Japón, Kanai et.al.(1954) utilizó este método hace treinta años para clasificar el suelo en cuatro categorías, habiéndose utilizado dichos resultados con posterioridad en el reglamento sísmico del Japón. En Indonesia, Taniwangsa (1981) utilizó dicha metodología para realizar la microzonificación sísmica de la capital, Jakarta. En el Perú también se han realizado ensayos de microtrepidaciones anteriormente, en Chimbote (Morimoto et.al., 1971) y en Huaraz (Kuroiwa et.al., 1973).

Este trabajo documenta las mediciones de microtrepidaciones realizadas en las ciudades de Chimbote y Huaraz en 1983 como parte del Proyecto SISRA-ECOSIS patrocinado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur. Dicho proyecto consiste en determinar los efectos económicos de terremotos en el Area Andina, para lo cual se viene estudiando de manera particular el sismo del 31 de Mayo de 1970.

Los valores calculados del período predominante del suelo por microtrepidaciones se verifican con el análisis de amplificación sísmica unidimensional con deformaciones pequeñas. Para realizar este análisis se necesita información sobre los perfiles estratigráficos, modelan

do el suelo como un sistema de masa continua. El período predominante determinado por el análisis indicado coincide muchas veces con el período predominante obtenido del ensayo de microtrepidaciones en el mismo punto. Este análisis tan solo ha podido ser efectuado en Chimbote, debido a la existencia en dicha ciudad de información geotécnica pertinente.

#### 1.1 MICROTREPIDACIONES

Se define como microtrepidación la vibración natural del suelo con un período que varía entre 0.05 a 2 segundos y con una amplitud de 0.1 a 1 micrón.

Las microtrepidaciones se originan por causas naturales y artificiales; las causas naturales son condiciones volcánicas, ondas oceánicas y condiciones atmosféricas; mientras que las artificiales son el tráfico, las maqui-  
narias industriales, etc.

En el presente trabajo las ondas de microtrepidaciones se han grabado como datos analógicos en cassette, habiéndose también graficado durante la medición en un ploteador. En cada punto la medición se realizó durante diez minutos, en el gabinete se escogió cuidadosamente la par-

te de dicha grabación que no presentaba perturbaciones artificiales directas, para proceder con dicha parte a la digitación. Esta porción del registro de microtrepidación representa la onda de vibración natural del punto medido.

## 1.2 DETERMINACION DEL PERIODO PREDOMINANTE POR MICROTREPIDACIONES.

Se presenta de manera general el procedimiento seguido para determinar el período predominante del suelo en base a la medición de microtrepidaciones; para realizar dicho procedimiento es necesario un digitizador y una computadora electrónica. La Tabla 1.1 presenta esquemáticamente dicho procedimiento.

La onda analógica registrada en el campo se graba con el equipo donado por la Misión Japonesa en un cassette. Esta es una onda suavizada que corresponde a valores analógicos medidos en el campo. El primer paso en el procedimiento consiste en convertir los datos analógicos grabados en datos digitales discretos. En el presente trabajo dicho paso se realizó en el digitizador de Electroperú. Todo el procesamiento digital posterior se realizó en el centro de cómputo de la Universidad Nacional

de Ingeniería.

Con los datos digitizados se realiza la corrección de la línea base, ya que en la conversión de datos analógicos a digitales no se ha tomado en cuenta la línea base temporaria. Dicha operación se efectúa con el programa de cómputo CRAC del profesor Ohsaki de la Universidad de Tokyo (Ohsaki, 1972).

Con los datos digitizados corregidos por línea base se procede a determinar las curvas frecuencia-período. En este caso la frecuencia significa el número de veces que la onda de microtrepidaciones presenta el mismo período. La determinación de la curva frecuencia-período o espectro de Kanai se puede realizar por dos métodos: el método del cruce de la línea base y el método pico. Las dos metodologías están incorporadas en el programa de cómputo SPEH desarrollado por Ohsaki (1976) que ha sido utilizado en este proyecto. El pico de la curva frecuencia-período representa el período predominante, ya que es la componente que se repite más.

Para utilizar la clasificación de suelos de Kanai (Kanai y Tanaka, 1961) es preciso determinar el período predominante  $T_0$ , el período mayor  $T_L$ , el período promedio  $T_m$  y la amplitud mayor de las microtrepidaciones. Los períodos se determinan de las curvas frecuencia-pe-

ríodo y la amplitud con un programa de cómputo que aplica la teoría de densidad de probabilidades y la desviación estándar de la onda.

### 1.3 DETERMINACION DEL PERIODO PREDOMINANTE POR AMPLIFICACION SISMICA.

Se resume el procedimiento utilizado para predecir el período predominante de un perfil estratigráfico del terreno, utilizando la teoría de amplificación unidimensional de suelos. La Tabla 1.2 presenta esquemáticamente dicho procedimiento.

El primer paso es determinar mediante ensayos in-situ el perfil estratigráfico del terreno, que contenga información acerca del peso unitario del suelo, el valor N del ensayo de penetración estándar y la ubicación del nivel freático. Si se realiza exploración geosísmica se puede determinar el módulo cortante G para deformaciones pequeñas; en caso contrario se puede utilizar la ecuación empírica  $G = 1200 N^{0.8}$  que relaciona el módulo de corte con la penetración. El amortiguamiento se asume constante. Si la estratigrafía es complicada puede simplificarse ésta, mediante el programa de cómputo DREB (Ohsaki, 1975).

Una vez que se ha simplificado el perfil estratigráfico del terreno se utiliza la teoría de propagación unidimensional de ondas para deformaciones pequeñas, mediante el programa de cómputo DREE (Ohsaki, 1975).

Se obtiene la amplificación sísmica desde el estrato de referencia, que puede ser la roca base, hasta el estrato considerado en estudio, que es la superficie. El pico mayor del espectro de amplificación por vibración natural, sin considerar el efecto del nivel de deformación, indica el período fundamental del suelo considerado. Todo el análisis de simplificación de sondajes y de amplificación sísmica se ha llevado a cabo utilizando la metodología japonesa del Profesor Ohsaki en el Centro de Cómputo de la Universidad Nacional de Ingeniería.

En los apéndices I,II,III y IV se incluyen los registros de microtrepidaciones obtenidos en el presente trabajo - para las ciudades de Lima, Chimbote y Huaraz, las curvas frecuencia-período correspondientes, los datos de sondajes y los espectros de amplificación obtenidos de la computadora. También se incluyen los programas de cómputo utilizados.

TABLA 1.1

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL PERIODO PREDOMINANTE  
POR MICROTREPIDACIONES.

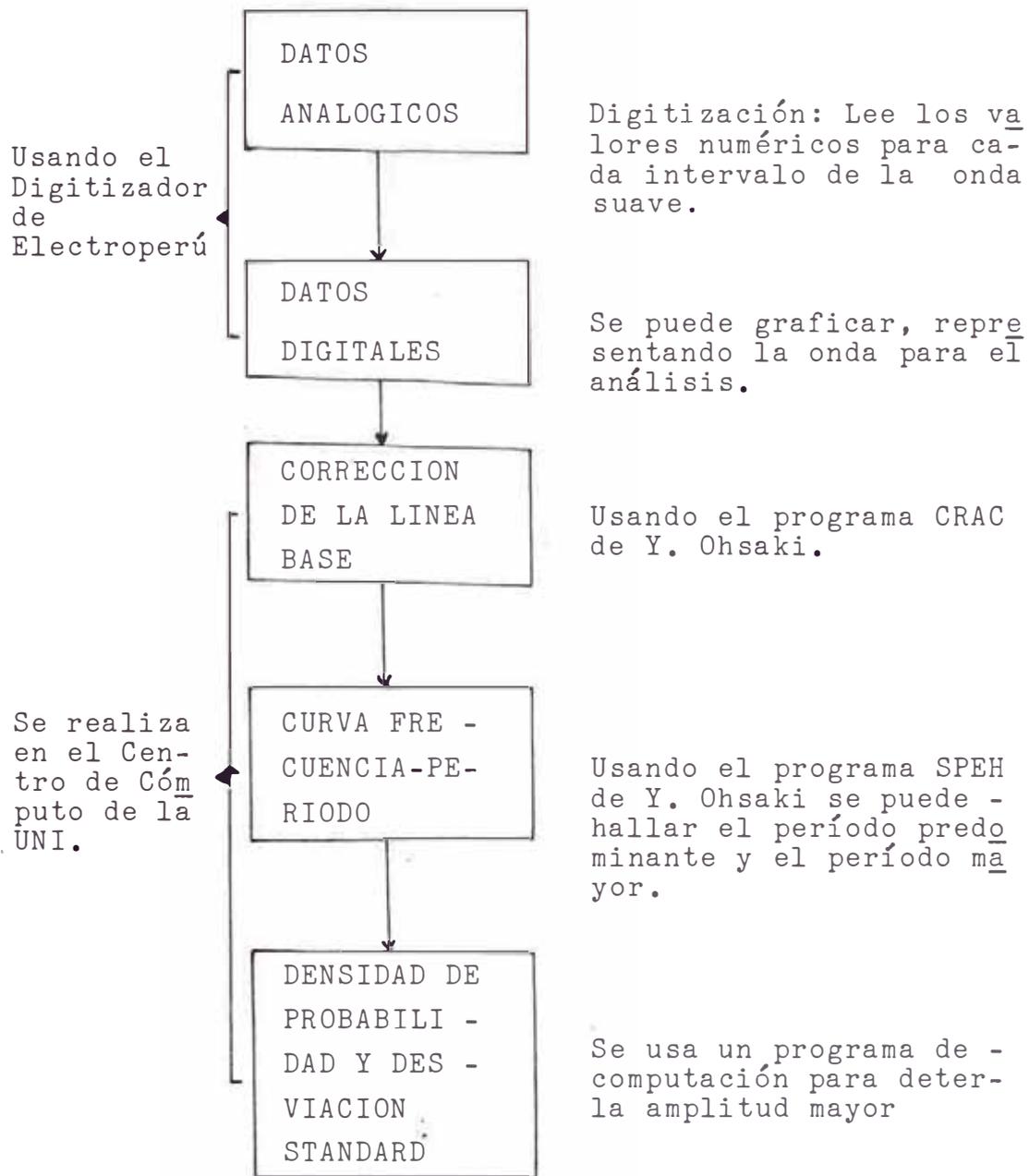
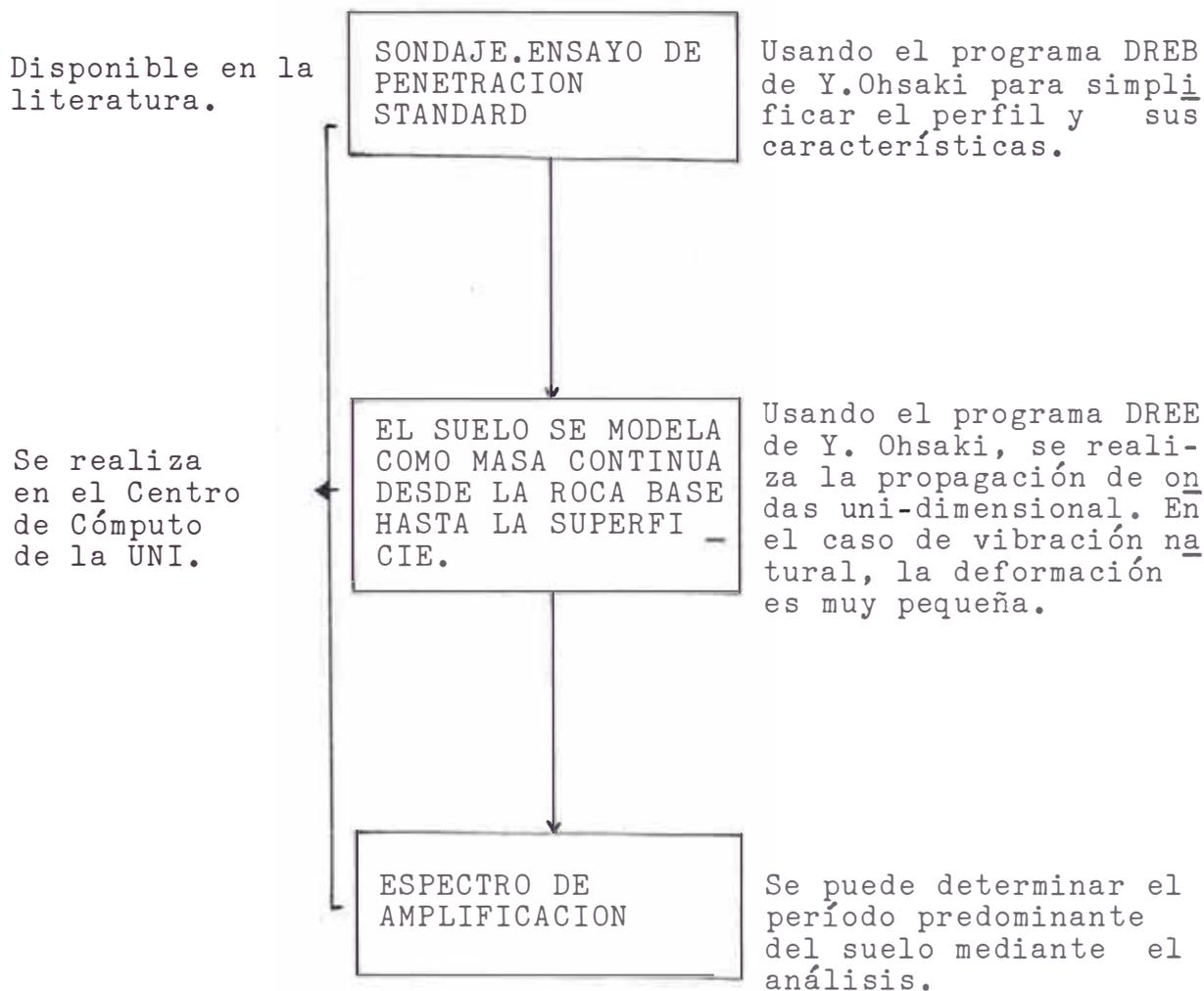


TABLA 1.2

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL PERIODO PREDOMINANTE POR AMPLIFICACION SISMICA.



## CAPITULO II

### TEORIA DE MICROTREPIDACIONES

#### 2.1 INTRODUCCION

En un lugar cualquiera, un sismógrafo que tiene más de al rededor de mil veces de amplificación registra los movimientos del suelo continuamente. Usualmente, las amplitudes de tales movimientos están en 0.1-1. micrones y el rango de sus períodos abarca de 0.05, 0.1 segundos hasta 1 y 2 segundos. Tales vibraciones del suelo son llamadas microtrepidaciones.

Las microtrepidaciones son causadas principalmente por perturbaciones artificiales tales como tráfico, máquinas industriales, etc.; también son causadas por perturbaciones de orden natural como el viento, ondas oceánicas, etc. Generalmente, a más grande una ciudad, mayores son las amplitudes de sus microtrepidaciones.

El estudio concerniente a las microtrepidaciones comenzó poco después que la Sismología había sido establecida como una rama de la Ciencia. Desde ese entonces, pequeñas investigaciones han sido realizadas intermitentemente hasta hace varios años, porque esto había sido considerado como un fenómeno de ligero interés en el estudio de

las ciencias naturales. En años recientes, algunas investigaciones de microtrepidaciones fueron llevadas a cabo para desarrollar no solo el estudio relativo de microsismos naturales sino también el de las ondas sísmicas de explosión. De las medidas sistemáticas de microtrepidaciones que han sido llevadas a cabo en miles de lugares en el Japón, se encontró que las propiedades del suelo como inferidas de las características de microtrepidaciones, son útiles para determinar el factor sísmico relativo al diseño de construcción antisísmica.

## 2.2 SINTESIS HISTORICA

Las investigaciones relativas a microtrepidaciones, fueron iniciadas en 1908 por F. Omori, quien, usando un instrumento muy simple observó la vibración del suelo, la cual no era vibración sísmica ni oscilación pulsatoria. El encontró que la vibración del suelo podría ser causada por el viento, ondas, o por perturbaciones artificiales tales como tráfico, máquinas, etc. Este tipo de vibración tiene un período corto y sus amplitudes son más pequeñas que las oscilaciones pulsatorias. El usó el término técnico, "microtremor" para referirse a este tipo de vibración.

Desde que el primer movimiento sísmico destructivo en "El Centro" (California) fué registrado exitosamente el 18 de Mayo de 1940 con el uso del "Strong Motion Seismograph", los estudios dinámicos en diseño sismo-resistente de estructuras han sido desarrollados muy rápidamente con las computadoras electrónicas.

Desde ese entonces, los estudios sobre las características de vibración del subsuelo también han sido considerados importantes y necesarios para los diseños dinámicos.

Desde 1950 han habido muchas investigaciones sobre las relaciones entre las características de microtrepidaciones y las condiciones del subsuelo. Kanai et.al. (1954) comenzó las observaciones de microtrepidaciones en varios lugares del Japón. En sus estudios construyó curvas de distribución frecuencia-período por medio del método "zero-crossing" y clasificó el suelo en 4 categorías que son designadas por los símbolos I-IV. Los mismos símbolos son todavía usados en el código de construcción del Japón.

Las distribuciones frecuencia-período de movimientos sísmicos fuertes y de microtrepidaciones en el mismo lugar, mostraron buena similaridad (Kanai y Tanaka, 1961).

Kanai consideró que las microtrepidaciones son causadas -

por las reflexiones múltiples de las ondas S en las capas de subsuelo. En cambio, K.Aki (1957) discutió estadísticamente las microtrepidaciones como ondas estocásticas estacionarias y las consideró como ondas dispersas de superficie.

Allan y Shima (1967) indicaron que los estudios sobre microtrepidaciones están siguiendo dos direcciones, como ondas de cuerpo en estado estable y como ondas de superficie; luego, después de detallados estudios de microsismos de período corto en Yukigaya en Tokio, Allan (1969) concluyó que las microtrepidaciones podrían ser explicadas como ondas S en estado estable y/o como modos fundamentales de ondas Love y Rayleigh en los sitios donde las interfaces de capas de subsuelo están claramente definidas.

Por lo tanto, es importante determinar con precisión la estructura subterránea en el sitio de observación por medio de exploración sísmica, con objeto de aclarar la naturaleza de las microtrepidaciones.

Estudios extensivos sobre la relación entre las microtrepidaciones y los daños sísmicos también han sido llevados a cabo. Atendiendo a esto, ha sido aclarado que la relación entre lo que es llamado período predominante y la es

estructura subterránea es muy importante.

### 2.3 LA DISTRIBUCION DE PERIODOS DE MICROTREPIDACIONES.

La curva de distribución de períodos de microtrepidaciones muestra una forma definida para cada tipo de subsuelo.

Esto es, cuando la formación del suelo relativa a las características de vibración es simple, como por ejemplo - en el caso de una capa estratificada simple, un pico relativamente agudo aparece alrededor de 0.1 - 0.6 segs., en la curva de distribución de período de microtrepidaciones.

En cambio cuando la formación del suelo es compleja, mas de dos picos aparecen en los períodos entre más cortos que 0.2 seg. y más largos de 1.0 segs. en la curva mencionada anteriormente.

En el Japón se constató que en una montaña un pico agudo aparece en el período de 0.1-0.2 segs., mientras que en terreno diluvial firme, tal como en las afueras de Tokio, el pico está en el período de 0.2-0.4 segs. En el suelo aluvial blando, tal como en el centro de Tokio, la curva es de forma irregular y un número de picos aparecen en el rango de períodos de 0.4-0.8 segs. Especialmente en

suelo blando de gran espesor la curva es plana, los períodos fluctúan entre 0.05 seg., 0.1 seg. hasta 1,2 seg.

Registros de microtrepidaciones en varios tipos de suelos con su correspondiente curva de distribución de períodos se muestran en la figura 2.1.

La curva de distribución de períodos está en muchos casos grandemente influenciada por las propiedades del primer estrato del suelo estratificado. En cambio, las curvas en roca fresca así como en roca base (bedrock) son planas en un rango de períodos menores de 0.1 seg. a mayores de 1 seg.

De estos hechos se considera que las amplitudes de microtrepidaciones en la superficie son mayores en los períodos que coinciden con los períodos naturales del subsuelo por el hecho de entrar en resonancia.

#### 2.4 CLASIFICACION DEL TERRENO POR MICROTREPIDACIONES.

A continuación se presentará las propuestas de clasificación del terreno por microtrepidaciones, realizadas en el Japón (Kanai y Tanaka, 1961).

#### 2.4.1. Primera propuesta de clasificación del terreno.

no.- Ha sido establecido anteriormente que los períodos predominante, medio y mayor cambian sus valores ligeramente cuando son medidos (aquí, el período mayor significa la onda más amplia medida por el medidor de microtrepidaciones, que tiene un período natural de un segundo y un apropiado amortiguamiento). Es conveniente usar los períodos mayor y medio en una clasificación práctica de suelos, aunque su significado físico hasta ahora no ha sido aclarado.

Por lo tanto, un diagrama como el mostrado en la fig.2.2 el cual ha sido obtenido por el método de tanteos considerando los resultados de medidas de microtrepidaciones así como las condiciones de subsuelo, es tomado como la primera propuesta en una clasificación de el suelo. Los símbolos I, II, III, y IV en la fig. 2.2 representan los tipos de suelo usados en el Código de Edificación (Building Code) del Japón y las normas para la designación de dichos tipos de suelo, son presentados posteriormente.

#### 2.4.2. Segunda propuesta de clasificación del terreno.

no.- Se ha experimentado muchos casos en los cuales los resultados de clasificación del suelo por tan

sólo la primera propuesta son considerados un tanto forzados. Algunos de ellos son descritos como sigue:

a) El período predominante de período corto aparece en un suelo muy blando y de gran espesor, porque tal suelo consiste de varias capas y la influencia de la capa superior es notable.

b) La curva de distribución de períodos en roca fresca, roca base y lomas de arena toman una forma muy plana.

Después de lo cual, es inevitable que la amplitud mayor de las microtrepidaciones deba ser tomada en una clasificación del terreno aunque las amplitudes mayores cambien sus valores no solamente con las horas, sino también por medio de circunstancias artificiales.

Consecuentemente, el diagrama de la relación de la amplitud mayor al período predominante, el cual ha sido también obtenido después de usar el mismo método de la primera propuesta, como se muestra en la figura 2.3, es adoptado auxiliariamente. Aquí la amplitud mayor significa el promedio de las amplitudes grandes que a menudo aparecen.

Esto se denomina la segunda propuesta en clasificación de suelos.

2.4.3. Daños de sismos y tipos de clasificación de terreno por microtrepidaciones.- Estadísticamente se ha llegado a notar en el Japón que existe una correlación entre el porcentaje de daño sísmico en casas de madera y el tipo de suelo determinado por microtrepidaciones. Se notó que en el suelo de tipo I ocurría una mínima cantidad de daños y estos iban en aumento a medida que cambiaba el tipo de suelo, notándose la mayor cantidad de daños en los suelos tipo IV.

Los cuatro tipos de terreno del Código de construcción del Japón son los siguientes: (Kanai,1961).

TIPO I : Terreno consistente de roca, grava arenosa dura, etc. clasificado como del terciario o estratos más antiguos, sobre una área considerable alrededor de la estructura.

TIPO II : Terreno consistente de grava arenosa, arcilla dura arenosa, marga, etc. clasificado como diluvial o aluvial gravoso, de 5 mts. o más de espesor, sobre un área considerable alrededor de la estructura.

TIPO III : Terreno consistente de depósito aluvial de 5 mts. o más de espesor, puede ser distinguido del terreno de la clase II por su formación de acantilado.

TIPO IV : Terreno aluvial consistente de depósitos blandos tipo delta, terreno vegetal, lodos o similares (incluyendo cualquier amontonamiento), cuya profundidad es de 30 metros o más.

Las tierras ganadas al mar, por restauración de pantanos o ciénagas, en los cuales el relleno tiene una profundidad de 3 mts. o más, y donde no haya transcurrido todavía aproximadamente treinta años después de la recuperación.

## 2.5 CONCLUSIONES

La respuesta de una estructura a movimientos sísmicos destructivos depende grandemente de la composición del terreno en el cual la estructura descansa.

De las investigaciones hechas en el Japón se encontró -

que cualquier lugar tiene un tipo definido de curva de distribución de períodos de sus microtrepidaciones y esta tiene considerablemente buena similaridad con las curvas de movimientos sísmicos en el mismo lugar. (Kanai, 1961).

Generalmente, el período predominante de un movimiento sísmico está muy conectado con el período de máxima frecuencia de las microtrepidaciones medido en el mismo lugar, como lo demuestran las confrontaciones de estas curvas en San José California, Seattle Washington, Aoyama Tokio y diversas ciudades del Japón (Kanai y Tanaka, 1961), (Kanai, 1962), (Kanai, Tanaka, Morishita y Osada, 1966). Además, en un lugar en el cual la curva de distribución de períodos de microtrepidaciones tiene un pico único, el período pico coincide claramente con el período predominante de los movimientos sísmicos. En cambio, en un lugar en el cual la curva de distribución de períodos de microtrepidaciones tiene más de dos picos, el período predominante de los movimientos sísmicos toma usualmente cualquiera de ellos y algunas veces, muchos de ellos.

Igualmente en el Japón se verificó que las medidas de microtrepidaciones son útiles como un medio no solamente

te para anticipar los efectos de movimientos sísmicos - destructivos, sino también para determinar el coeficiente de fuerza sísmica a ser considerado en el diseño de construcción anti-sísmica (Kanai, 1961).

Las curvas frecuencia-período de microtrepidaciones pueden clasificarse aproximadamente en tres grupos. Las curvas que tienen un pico agudo pertenecen al primer grupo, aquellas que tienen varios picos, al segundo grupo; y al último grupo pertenecen las curvas muy planas. (Kanai, Tanaka, Osada, 1954).

Las curvas del primer grupo corresponden a los resultados matemáticos concernientes a la relación amplitud-período en el caso de un estrato superficial. Las curvas del segundo grupo son muy similares a los resultados calculados en el caso cuando hay dos o tres estratos de diferente impedancia vibracional entre la roca basal y la superficie, mientras que las curvas del tercer grupo coinciden con los resultados calculados en el caso donde la capa superficial consiste de muchos estratos de diferente impedancia vibracional.

De los resultados de las medidas de microtrepidaciones, se mostró que parece haber algunas similitudes entre el mecanismo de generación de microtrepidaciones y ondas sísmicas que llegan a la roca basal (Kanai, Tanaka, Osada, 1954).

La medición de microtrepidaciones constituye una técnica rápida, económica y efectiva de Microzonificación mediante la aplicación fundamental de la clasificación del terreno de fundación a partir de las propiedades inferidas de sus características de microvibraciones y su distribución de períodos.

Se han efectuado en los primeros años de la década del 60, varias microzonificaciones de ciudades japonesas mediante un uso extensivo de medidas de microtrepidaciones y clasificación de suelos por dicho método, los cuales se compararon con los mapas de daños sísmicos a edificaciones durante los terremotos de Tonankai 1944, Nankaido 1946, encontrándose una buena correlación entre el porcentaje de daño a las edificaciones y el tipo de suelo. (Ohsaki, 1972).

El segundo método de clasificación de suelos por microtrepidaciones, con el diagrama de amplitudes mayores vs. períodos predominantes se usa en forma auxiliar debido a las variaciones de las amplitudes respecto al tiempo por circunstancias artificiales.

El método de clasificación de suelos presentado, es conveniente de ser usado en atención a una clasificación -

práctica del suelo, principalmente cuando sus características físicas no han sido establecidas claramente.

## CAPITULO III

### TEORIA DE PROPAGACION DE ONDAS UNIDIMENSIONALES CON DE- FORMACIONES PEQUEÑAS.

#### 3.1 INTRODUCCION.

Las principales características dinámicas de los suelos son: La densidad de masa del suelo, el módulo de corte o velocidad de onda de corte y el factor de amortiguamiento del suelo.

El fenómeno de amplificación de ondas sísmicas es de gran importancia en el estudio de dinámica de suelos, con propósitos de lograr construcciones antisísmicas; se tiene la experiencia que en los suelos blandos los daños producto de un sismo son mayores que en los suelos duros, probablemente debido a problemas de amplificación sísmica.

En el presente trabajo se ha empleado la teoría de amplificación unidimensional de ondas considerando al suelo como un medio elástico, homogéneo y semi-infinito y trabajando en el rango de las deformaciones pequeñas. Esta teoría trata la amplificación de ondas a través de los estratos del suelo desde la base rocosa o similar hasta la superficie del suelo. Se considera que los estratos son

horizontales.

La solución de la ecuación de movimiento puede ser por medio del sistema discreto o del sistema continuo. En el sistema continuo se trabaja en base de derivadas parciales y la solución es compleja y exacta. En el sistema discreto se trabaja en base de derivadas totales. Los errores nunca exceden del 10% y por lo general están dentro del 3% al 5% realizando convenientemente las subdivisiones de los estratos del suelo.

El sistema empleado en el presente trabajo es el sistema continuo, ya que se cuenta con la ayuda de la computadora. Los resultados obtenidos de este análisis son: el espectro de amplificación y por consiguiente, los modos de vibración y sus correspondientes períodos, siendo el más importante, el primer modo, que proporciona el período fundamental de la masa del suelo.

### 3.2 CARACTERISTICAS DINAMICAS DE LOS SUELOS.

Los parámetros fundamentales, representativos y característicos de la Dinámica de Suelos, son los siguientes:

- 1) Densidad de Masa ( $\rho$ ), ( $t \times \text{seg}^2/m^4$ ) o Peso Unitario ( $\gamma$ ), ( $t/m^3$ )

$$\rho = \gamma / 9.8$$

2) Módulo de Corte (G), ( $t/m^2$ ) o Velocidad de Onda de Corte ( $V_s$ ) (m/seg.).

$$G = \rho V_s^2$$

3) Coeficiente de Viscosidad ( $\eta$ ), ( $t \times \text{seg}/m^2$ ) o Factor de Amortiguamiento ( $\beta$ ).

3.2.1 Densidad de Masa o Peso Unitario.- La Masa del suelo puede ser obtenida por métodos bien conocidos; generalmente para determinar el peso unitario de un suelo sumergido en agua, la fórmula es la siguiente:

$$\gamma' = \gamma - 1$$

pero para efecto del análisis dinámico, se considera el peso unitario ( $\gamma'$ ), ya que las partículas del suelo se mueven con el agua que las rodea.

3.2.2 Módulo de Corte.- El Módulo de Corte puede ser determinado de diferentes formas, también puede ser estimado aproximadamente de la prueba de penetración standard, mediante la siguiente fórmula:

$$G = 1200 N^{0.8} (t/m^2)$$

$N$  = Número de golpes de penetración standard.

La fórmula dada es independiente del tipo de suelo y de la altura con respecto a la superficie del suelo de la que ha sido sacada la muestra. (Ohsaki e Iwasaki, 1973).

El módulo de corte así estimado corresponde a deformaciones pequeñas y es aproximadamente igual a las correspondientes deformaciones del suelo obtenidas en exploración sísmica.

3.2.3 Amortiguamiento del Suelo.- Para representar el mecanismo de amortiguamiento en los suelos, se usan frecuentemente los modelos de Voigt y el de Maxwell que relacionan el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) ( $t/m^2$ ) con el Módulo de Corte ( $G$ ) y el coeficiente de viscosidad ( $\eta$ ).

Por estudios cuidadosos se determinó que el amortiguamiento actual de los suelos no es ninguno de los dos tipos nombrados, sino que es un tipo de amortiguamiento constante con respecto a las frecuencias como se aprecia en la figura 3.1.

Aplicando la última reflexión y de lo rescatable del modelo Voigt, se llega a la siguiente relación:

$$\eta w/G = 2\beta, \quad \text{donde: } \eta w/G = \text{Constante. Y:}$$

$\eta$  = Coeficiente de viscosidad.

$w$  = Frecuencia angular del suelo (1/seg.)

$G$  = Módulo de Corte.

$\beta$  = Factor de Amortiguamiento (Adimensional).

Ohsaki (1975), propone que el modelo más razonable para suelos puede ser una combinación del resorte ( $G$ ) y del amortiguador  $\eta = 2\beta G/w$ , tal modelo de amortiguamiento es llamado modelo de amortiguamiento histerético o modelo histerético constante.

En combinación con un resorte lineal ( $G$ ), el sistema completo mostrado en la figura 3.2 es frecuentemente referido a un modelo histerético lineal.

Similarmente al Módulo de Corte ( $G$ ), el factor de amortiguamiento ( $\beta$ ) cambia considerablemente con el cambio de deformaciones, como en la arena y la arcilla. Pero - para deformaciones pequeñas, el factor de amortiguamiento puede ser asumido:

$$\beta = 2\% \quad (\text{Para arena o arcilla}). \quad (\text{Ohsaki, 1975}).$$

### 3.3 TEORIA DE AMPLIFICACION UNIDIMENSIONAL.

A continuación se presenta el fundamento teórico de la teoría en mención, desarrollado por Ohsaki (1975).

Todos los problemas asociados con movimientos sísmicos son tridimensionales. Sin embargo, para la solución del problema de diseño y análisis en Ingeniería Antisísmica, se usa el plano, o sea dos dimensiones, con una componente horizontal y una componente vertical. La otra componente horizontal se considera separadamente.

En el análisis dinámico de los depósitos de suelos hay numerosas razones para que uno pueda simplificar los problemas a un modelo unidimensional.

- 1) Frecuentemente hay un gran interés en los terremotos destructivos. El centro de liberación de energía de los sismos destructivos está por lo general cerca al sitio o a la ciudad en sollicitación sísmica; por lo tanto, las ondas sísmicas viajan haciendo un ángulo más pequeño con la componente vertical que con la componente horizontal.
- 2) Las rocas y los estratos de suelo tienden a ser frecuentemente blandos cerca a la superfi-

cie del suelo. La dirección de propagación de ondas sísmicas, se acerca bastante a la dirección vertical, cuando las mencionadas ondas pasan a través de los estratos blandos, de acuerdo con la ley de Snell en óptica (Teoría de reflexión y refracción de ondas), como se aprecia en la figura 3.3.

- 3) Sin embargo las condiciones de los suelos pueden cambiar a lo largo de la dirección horizontal, la razón de cambio en la dirección horizontal es mucho más pequeña que en la dirección vertical. Se ha encontrado un número grande de casos, donde la horizontalidad de los estratos asumida puede ser justificada.
- 4) Durante los sismos, se notan ondas de superficie, tales como ondas Love o Rayleigh, las cuales viajan a lo largo de la superficie del suelo. Ellas tienen gran amplitud, y en general son de períodos largos; sin embargo, no desarrollan grandes aceleraciones y su contribución a dañar estructuras potencialmente puede ser menor. Los grandes daños sobre las estructuras pueden ser probablemente debido a las on

das de corte.

Sobre la base de estas razones, los movimientos sísmicos son frecuentemente tratados por la propagación unidimensional de las ondas de corte, a lo largo de la dirección vertical.

Si los fundamentos mencionados no cumplen aproximadamente con el modelo asumido, si las condiciones de suelo cambian extraordinariamente en la dirección horizontal, como la localización de A en la figura 3.3, o cuando la especial atención deba ser puesta a los efectos de ondas superficiales; los análisis bi y tridimensionales por medio de elementos finitos pueden ser usados en vez de la teoría de amplificación unidimensional; los análisis mencionados también tienen sus limitaciones.

### 3.4 SIMPLIFICACION DE PERFILES DE SUELO

Antes de realizar un análisis dinámico de depósitos de suelos, es recomendable y frecuentemente necesario, simplificar adecuadamente el registro de sondaje, si este es muy complicado mas allá de lo significativo. Ohsaki y Sakaguchi (1972) describieron un procedimiento para obtener un perfil de suelo adecuado para análisis dinámico sobre la base del concepto del "factor tipo de suelo" (STF) y del valor N del ensayo de penetración standard. Combinando la simplificación del registro de sondaje por ambos caminos, se obtiene un perfil simplificado en el cual puede realizarse convenientemente el análisis dinámico.

3.4.1. Simplificación por Tipos de Suelo.- El objetivo de este procedimiento es obtener una razonable simplificación del registro de sondaje original, tomando en consideración el cambio de tipo de suelo entre los estratos consecutivos. Es decir, si dos estratos consecutivos son de características parecidas como por ejemplo estratos compuestos de arcilla arenosa y arena arcillosa, puede ser pertinente considerar a dichos estratos como uno de una mixtura arena-arcilla. En el caso de dos estratos consecutivos compuestos por ejemplo de pura arena

y pura arcilla, el límite entre ellos no debe ser removido.

Para realizar la simplificación de perfiles mediante una computadora, es necesario asignar un valor numérico a cada tipo de suelo. Para este propósito, el concepto de "factor tipo de suelo" (STF) ha sido propuesto. La tabla 3.1 aclara lo expuesto dándole a cada tipo de suelo una designación con dos caracteres y su respectivo valor STF.

Como se aprecia en la tabla 3.1, el limo es incluido en la categoría de arcilla para efectos de computación.

La simplificación de perfiles se efectúa de acuerdo al cambio del factor tipo de suelo (STF) entre dos estratos consecutivos. Los límites entre los estratos consecutivos son puestos si la diferencia en sus STF excede a  $2/3 = 0.666$  en el rango menor que 1 de los originales STF, y a 0.25 en el rango mayor que 1. De otro modo, los estratos consecutivos son considerados como un único estrato.

3.4.2. Simplificación por valor de N de penetración standard.-Sobre la base de los valores N del ensayo de penetración standard, también se realiza la

simplificación de perfiles. El principio de esta operación es colocar un límite donde un cambio significativo entre dos valores sucesivos de N es encontrado. El criterio para poner límites toma en cuenta la dispersión de todos los valores de N, y puede ajustarse el umbral puesto de manera que varios grados de simplificación pueden ser obtenidos de acuerdo con el propósito que se tenga para usar el perfil simplificado.

Inicialmente se hallan las diferencias de los sucesivos valores de N ( $\Delta N$ ), entonces a los  $\Delta N$ 's se les halla el valor medio ( $\overline{\Delta N}$ ) y la desviación standard ( $\sigma$ ). Posteriormente, es determinado el umbral:

$$\Delta N^* = \overline{\Delta N} + C\sigma \quad \dots\dots\dots (1)$$

El valor C es opcional y se denomina coeficiente de simplificación ( $C = 0,1,2 \dots$ ). Finalmente, en un punto intermedio de 2 valores de N, cuya diferencia exceda a  $\Delta N^*$ , un límite es definido.

3.4.3. Simplificación resultante de perfiles.- Los límites finales del perfil simplificado son una resultante de la superposición de los límites alcanzados por los dos criterios descritos anteriormente. Los substratos indi-

viduales en el registro original de sondaje que están dentro de los límites determinados por la simplificación, son unificados en un único estrato.

En cuanto a cada estrato unificado, el promedio ponderado de los STF's con el espesor de cada subestrato como un peso, y el promedio de los valores originales de N dentro de los límites alcanzados, son calculados. El nuevo símbolo para el estrato unificado se toma de acuerdo al STF promedio según la tabla 3.1. El coeficiente de simplificación C en la ecuación (1) tiene el efecto de controlar el grado de simplificación.

Ohsaki (1975), presenta el programa de cómputo DREB, utilizado en el presente trabajo, que realiza automáticamente el procedimiento descrito, en base al tipo de suelo y los valores N del ensayo de penetración standard con su respectiva profundidad. También es determinado el peso unitario para cada estrato en base al STF, asumiendo que los pesos unitarios de la arcilla y la arena son 1.5 y 1.85 ton/mt<sup>3</sup> respectivamente, como se muestra en la figura 3.4. Los pesos de los demás tipos de suelo se determinan por interpolación.

Ohsaki y Sakaguchi (1972) indican también que puede ha-

cerse una modificación manual al resultado de la computadora, para añadir o quitar límites, cuando sea considerado necesario.

Como roca base se puede tomar un estrato en el cual la velocidad de onda de corte sea de  $V_s \geq 500$  mt/seg. y su peso unitario sea de aproximadamente  $\gamma = 2.00$  ton/mt<sup>3</sup> (Ohsaki, 1975).

### 3.5 ANALISIS DINAMICO DE DEPOSITOS DE SUELOS COMO SISTEMA CONTINUO.

A continuación se presenta el análisis desarrollado por Ohsaki (1975).

3.5.1. Ecuación de Movimiento.- Considera un elemento pequeño infinitesimal de un depósito de suelo, como se muestra en la Fig. 3.5 el cual se encuentra a una profundidad (Z) y desplazado por E (Z,t) de su posición en un tiempo (t).

Esfuerzo de corte =  $\tau (Z,t)$

Aceleración en la dirección X :  $\frac{\partial^2 E (Z,t)}{\partial t^2}$

Fuerza de la inercia en la dirección X:  $-\rho(z) \Delta z \frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial t^2}$

Equilibrio de fuerzas:

$$\frac{\partial \tau(z,t)}{\partial z} - \rho(z) \frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial t^2} = 0$$

Deformación de Corte:

$$e(z) = \frac{\partial E(z,t)}{\partial z}$$

Según la ecuación  $\tau = G e + \eta \dot{e}$ , se tiene, del modelo Voigt:

$$\tau(z,t) = G(z) \frac{\partial E(z,t)}{\partial z} + \eta(z) \frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial t \partial z} \quad (3.1)$$

derivando la ecuación (3.1) con respecto a  $\frac{\partial}{\partial z}$  y sustituyendo términos:

$$\rho(z) \frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \eta(z) \frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial t \partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ G(z) \frac{\partial E(z,t)}{\partial z} \right] = 0 \quad (3.2)$$

la ecuación (3.2) es la ecuación del movimiento de los depósitos de suelos como sistema de corte continuo.

Se asume que el desplazamiento del estrato de la base es  $Y(t)$  y el desplazamiento relativo de los depósitos de

suelos al estrato de la base es  $X(Z,t)$  :

$$E(Z,t) = X(Z,t) + Y(t) \quad (3.3)$$

reemplazando la ecuación (3.3) en (3.2) :

$$\begin{aligned} \rho(Z) \frac{\partial^2 x(Z,t)}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial Z} \left[ \eta(Z) \frac{\partial^2 x(Z,t)}{\partial t \partial Z} \right] - \frac{\partial}{\partial Z} \left[ G(Z) \frac{\partial x(Z,t)}{\partial Z} \right] = \\ = - \rho(Z) \frac{\partial^2 Y(t)}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3.4)$$

además si se asume que el depósito de suelo es uniforme, entonces,  $\rho(Z)$ ,  $G(Z)$  y  $\eta(Z)$  no cambian con la profundidad. Por lo tanto las ecuaciones (3.2) y (3.4) se transforman:

$$\rho \frac{\partial^2 E(Z,t)}{\partial t^2} - \eta \frac{\partial^3 E(Z,t)}{\partial t \partial Z^2} - G \frac{\partial^2 E(Z,t)}{\partial Z^2} = 0 \quad (3.5)$$

$$\rho \frac{\partial^2 x(Z,t)}{\partial t^2} - \eta \frac{\partial^3 x(Z,t)}{\partial t \partial Z^2} - G \frac{\partial^2 x(Z,t)}{\partial Z^2} - \rho \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} \quad (3.6)$$

3.5.2. Solución de la Ecuación de movimiento para depósitos de suelos estratificados.- Toman do las coordenadas  $x_k$ ,  $Z_k$  ( $k=1,2,\dots,N$ ;  $N$  = número del estrato base) en cada estrato como se muestra en la Fig. N° 3.6 donde los parámetros  $\rho_k$ ,  $G_k$ ,  $\eta_k$ , son uniformes y representan las características del suelo.

De la ecuación (3.5) para cada estrato se tiene:

$$\rho_k \frac{\partial^2 E_k(z_k, t)}{\partial t^2} - \eta_k \frac{\partial^3 E_k(z_k, t)}{\partial t \partial z_k^2} - G_k \frac{\partial^2 E_k(z_k, t)}{\partial z_k^2} = 0$$

ó

$$G_k + \eta_k \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial^2 E_k(z_k, t)}{\partial z_k^2} = \rho_k \frac{\partial^2 E_k(z_k, t)}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

Si todo el depósito de suelo es asumido para ser vibrado con frecuencia constante ( $\bar{\omega}$ ), es ya conocido que:

$$\eta_k = \frac{2 \beta_k G_k}{\bar{\omega}} \quad (3.8)$$

y se puede poner:

$$E_k(z_k, t) = u(z_k) e^{i\bar{\omega}t} \quad (3.9)$$

donde  $u(z_k)$  representa la forma de deflexión del estrato y se llama Forma de Modo.

Si las ecuaciones (3.8) y (3.9) se sustituyen en la ecuación (3.7), se obtiene una ecuación diferencial respecto a  $u(z_k)$  :

$$\frac{d^2 u(z_k)}{dz_k^2} + \frac{\rho_k \bar{w}^2}{G_k(1 + 2\beta_k i)} u(z_k) = 0 \quad (3.10)$$

donde  $i = \sqrt{-1}$  y  $G_k(1 + 2\beta_k i)$  es llamado módulo de corte complejo. Además si se coloca en la ecuación (3.10) :

$$\frac{\rho_k \bar{w}^2}{G_k(1 + 2\beta_k i)} = p_k^2 \quad (3.11)$$

la cual es a veces llamado constante de propagación, la ecuación (3.10) puede ser expresada como :

$$\frac{d^2 u(z_k)}{dz_k^2} + p_k^2 u(z_k) = 0$$

la solución de esta ecuación es:

$$u(z_k) = A_k e^{ip_k z_k} + B_k e^{-ip_k z_k} \quad (3.12)$$

Reemplazando la ecuación (3.12) en la ecuación (3.9)

tenemos:

$$E_k(Z_k, t) = (A_k e^{ip_k Z_k} + B_k e^{-ip_k Z_k}) e^{i\bar{\omega}t} \quad (3.13)$$

De la ecuación (3.13) se tiene para aceleración:

$$\ddot{E}_k(Z_k, t) = -\bar{\omega}^2 (A_k e^{ip_k Z_k} + B_k e^{-ip_k Z_k}) e^{i\bar{\omega}t}$$

por consiguiente:

$$\ddot{E}_m(o, t) = -\bar{\omega}^2 (A_m + B_m) e^{i\bar{\omega}t}$$

$$\ddot{E}_n(o, t) = -\bar{\omega}^2 (A_n + B_n) e^{i\bar{\omega}t}$$

Tomando la relación de ambas aceleraciones y considerando la frecuencia como una variable, se puede definir la función respuesta de frecuencia aceleración a aceleración:

$$H_{m/n}(\omega) = \frac{A_m + B_m}{A_n + B_n}$$

A y B son constantes de integración y pueden ser determinados por condiciones de frontera.

El valor absoluto de la función respuesta de frecuencia, usualmente llamada función respuesta de frecuencia aceleración a aceleración, y que representa la aceleración en la parte superior del m-ésimo estrato en relación a la aceleración en la parte superior del n-ésimo estrato, es:

$$A_{m/n}(w) = \left| H_{m/n}(w) \right|$$

La expresión anterior es llamada Relación de Amplificación o simplemente Amplificación entre el m-ésimo estrato y el n-ésimo estratos. Cuando la amplificación  $A_{m/n}(w)$  es graficada con la frecuencia circular ( $w$ ) o la frecuencia  $f = w/2\pi$ , a esto se le llama Espectro, de Amplificación.

Si  $m < n$ , es obvio que el pico del espectro representa la frecuencia natural del depósito de suelo que se presenta entre el m-ésimo y el n-ésimo estratos.

El Espectro de Amplificación puede tener varios picos, dependiendo del número de estratos. En cada pico, podemos obtener la frecuencia y por consiguiente, el período para cada modo de vibración. El primer modo de vibración proporciona el período fundamental del suelo respectivo.

La forma del espectro de amplificación es como la que se presenta en la figura 3.7, la cual ha sido obtenida tomando la amplificación entre la superficie y la roca base en un depósito de suelo.

El profesor Ohsaki (1975) preparó el programa de cómputo DREE, el cual tomando como datos, los parámetros dinámicos de cada estrato del depósito de suelo analizado, obtiene la amplificación existente entre dos estratos. En el presente trabajo se utilizó este programa para los perfiles de suelo disponibles en Chimbote hallando el espectro de Amplificación y por consiguiente los modos de vibración y sus respectivos períodos, tomando la razón de amplificación entre la superficie y la roca base o similar.

TABLA 3.1

Designación de suelos para simplificación de perfiles.

(Ohsaki y Sakaguchi, 1972)

TIPO DE SUELO	SIMBOLO	FACTOR TIPO DE SUELO (STF)	
		Valor representativo	Valor Límite
Arcilla o limo	CC	0	1/6
Arcilla arenosa ó Limo arenoso	SC	1/3	1/2
Arena arcillosa ó Arena limosa	CS	2/3	5/6
Arena	SS	1	13/12
Arena gravosa	GS	7/6	5/4
Grava arenosa	SG	4/3	17/12
Grava	GG	3/2	7/4
Roca	RR	2	

## CAPITULO IV

### ESTUDIOS PRELIMINARES

#### 4.1. REVISION DE TRABAJOS ANTERIORES

##### 4.1.1 INTRODUCCION

Anteriormente, se han realizado trabajos de microzonificación sísmica en varias localidades del Perú. En el presente estudio se revisa los trabajos de microzonificación más relevantes de las zonas en estudio (Chimbote y Huaraz), y también de otras zonas del Perú. Estos trabajos son: La microzonificación de Chimbote, realizada por la Misión Japonesa en 1971; la microzonificación de Huaraz, realizada por la Subcomisión Técnica CRYRZA y los trabajos de microzonificación en localidades de Arequipa, realizados a raíz del sismo que afectó dicha zona en 1979.

El presente trabajo de Tesis incorpora los resultados de microtrepidaciones y sondajes de los trabajos en las zonas en estudio y, desde un mismo punto de vista, desarrolla en ambos casos una metodología en el estudio de microtrepidaciones y la propagación unidimensional de ondas. Las comparaciones del caso entre los trabajos anteriores y el presente, se realizan en el capítulo V.

4.1.2. MICROZONIFICACION DE CHIMBOTE-MISION JAPONESA (Morimoto, et.al., 1971).

A raíz del sismo del 31 de mayo de 1970 que afectó seriamente esta zona y otras aledañas, el gobierno peruano pidió a su similar del Japón, ayuda para el apoyo técnico necesario para la reconstrucción de la ciudad de Chimbote.

El gobierno del Japón envió una misión especial, que realizó en la zona varios estudios encaminados a microzonificar el área en mención. La microzonificación propuesta para Chimbote por la misión, tomó en cuenta los siguientes parámetros: geología del área, condiciones del suelo, observaciones de microtrepidaciones, observaciones de aftershocks (réplicas), análisis del movimiento del suelo, estudios de distribución de daños a edificaciones y aspectos geológicos de los daños.

Las siguientes investigaciones fueron hechas en Chimbote, por la Misión Japonesa:

- 1) Estudio Geológico.- Se determinó la estructura del subsuelo por medio de estudios de campo e interpretación de aerofotografías del área, desde un punto de vista geológico y se tuvo en cuenta información macroscópica acerca de las condiciones del subsuelo. Este estudio con-

tribuyó grandemente a la preparación del mapa de microzonificación de Chimbote.

El mapa Geológico de Chimbote presentado por la misión japonesa, ha sido extrapolado a uno con mayores referencias de lugares, calles, etc. por el proyecto ECOSIS, - en la UNI (Barrón, 1984). El resultado se presenta en el mapa.P.4.1.

2) Sondajes y Ensayos de Penetración Standard.- Se realizaron para alcanzar directamente las condiciones del subsuelo y para conocer el nivel freático, la granulometría y las propiedades del subsuelo. De estos estudios, es posible obtener información si el subsuelo es susceptible o no a la licuación durante sismos.

Los resultados de este estudio fueron muy útiles para la preparación del mapa de microzonificación propuesta por la misión japonesa.

En el presente trabajo de Tesis, fueron utilizados los parámetros de todos los sondajes presentados por la Misión, para aplicar la teoría de Propagación Unidimensional de Ondas en el área de Chimbote, por lo tanto se presenta mayor información al respecto en el capítulo correspondiente.

3) Estudio de Distribución de daños a edificaciones, carreteras y fallas de suelo.- Fué realizado un estudio intensivo sobre construcciones de ladrillo en toda la ciudad. En el centro de la ciudad se hizo un estudio de la relación entre el daño a estructuras y las fallas de la superficie del suelo. Se tomó en cuenta que las construcciones de adobe fueron destruídas casi completamente.

4) Observación de After-Shocks(Réplica de sismo)- Esta observación se llevó a cabo para obtener propiedades dinámicas de la superficie del suelo, utilizando las réplicas que siguen al sismo principal. De los resultados de estos análisis se confirmó que la intensidad del sismo en la capa aluvial es menor que en la superficie rocosa.

5) Observaciones de Microtrepidaciones- Se realizaron para obtener propiedades dinámicas de las capas superficiales del suelo,tales como el período predominante. De los resultados se consideró aproximadamente que la superficie del suelo es dura y densa desde el punto de vista de propiedades dinámicas.

En el presente trabajo de tesis, igualmente se tomó en cuenta todos los resultados de microtrepidaciones de la Misión Japonesa; en el capítulo correspondiente se pre

senta mayor información al respecto, habiéndose realizado las comparaciones del caso.

6) Análisis del movimiento del suelo- Utilizando como datos las condiciones del subsuelo, las características del movimiento de la superficie del suelo pueden ser calculadas con la "Teoría de Reflexión de Ondas de Corte". De acuerdo a los resultados de computación, los períodos predominantes y el comportamiento dinámico de los estratos superficiales pueden ser supuestos.

En el área de Chimbote, el movimiento de la superficie del suelo fué calculado por medio de la "Teoría de Multireflexión", que usa la velocidad de ondas de corte, derivada del valor N del ensayo de Penetración Standard.

7) Microzonificación Propuesta- El mapa de Microzonificación de Chimbote propuesto por la misión japonesa, desde un punto de vista de utilización de la tierra, especialmente para el diseño antisísmico de estructuras; fué ejecutado principalmente sobre la base de los resultados obtenidos de los estudios Geológicos, sondajes y distribución de daños a estructuras.

Análogamente al mapa geológico, el mapa de microzonificación ha sido extrapolado en el proyecto ECOSIS. El -

resultado se presenta en el mapa P.4.2 que tiene una información completa (Barrón, 1984).

4.1.3. MICROZONIFICACION DE HUARAZ-SUBCOMISION TECNICA CRYRZA (Armas, 1973).

Con el propósito de reconstruir sobre bases técnicas, - científicas, la ciudad de Huaraz, destruída por el sismo de 70, se realizó dicho estudio sísmico.

Dentro de los estudios realizados en Huaráz, se puede mencionar los siguientes: Geología, Geomorfología, Estratigrafía del suelo, Hidrogeología, Efectos Sísmicos, Gravimetría (Estudio del basamento rocoso: Prospección por gravedad), microtrepidaciones y evaluación de daños en edificaciones.

1) Estudio Geológico y Geomorfológico- Estos es .tudios se resumen en el mapa geomorfológico presentado por CRYRZA. Como parte del proyecto ECOSIS en la UNI, - en base a dicho mapa y a la interpretación de fotografías aéreas, se hizo la extrapolación correspondiente a un mapa actualizado (P.4.3). Esta mapa contiene una información completa (Ordóñez, 1984).

2) Estudio de gravimetría- De este estudio se

obtuvieron profundidades del basamento rocoso en toda el área en estudio. Se obtuvo que las profundidades del basamento rocoso, oscilan en general entre 0 y 120 metros.

3) Microtrepidaciones- Para el estudio dinámico de los suelos, se hizo uso de las investigaciones de microtrepidaciones, obteniéndose los períodos predominantes como características determinantes en la clasificación de los suelos. Se obtuvo para suelos buenos, períodos bajos; para suelos de calidad intermedia se obtuvo períodos también intermedios. Para suelos de baja calidad se obtuvo períodos altos. (Mapa P.4.4).

Los resultados de microtrepidaciones descritos, sirvieron para complementar el estudio correspondiente en el presente trabajo de tesis. Se proporciona una información más detallada en el capítulo correspondiente.

4) Evaluación de daños - Del presente estudio se pudo comprobar la interrelación que existe entre el comportamiento dinámico del suelo y el mayor o menor daño que pueda provocarse en una estructura cimentada en aquél. De los resultados se obtuvo que en los barrios de Patay, Centenario y Nicrupampa hubo 20-25% de daños, en cambio en los barrios de Pedregal y parte de La Soledad hubo un 60-80% de daños. En los barrios de San Francis-

co, Belén y Huarupampa, el porcentaje de daños fué del 50-95%.

5) Microzonificación Propuesta- En base a todos los estudios descritos anteriormente, CRYRZA procedió a Microzonificar Huaraz, dividiéndolo en 4 zonas, dando recomendaciones respecto a construcción en cada una de ellas.

#### 4.1.4. INVESTIGACIONES RECIENTES.

Anteriormente en el Perú, han habido otros trabajos de microzonificación sísmica, como en Aplao, Huancarqui, Corire, Camaná, Chuqibamba y Pampacolca, todas estas localidades ubicadas en Arequipa. Los trabajos se realizaron a raíz del terremoto que afectó dichas poblaciones en febrero de 1979. (Kuroiwa, 1982).

En los trabajos de microzonificación nombrados, realizados todos por un mismo equipo humano, se propone una metodología simplificada y de bajo costo para ser aplicada en asentamientos humanos de hasta unos 100,000 habitantes, con lo que se suponía, su campo de acción se ampliaba grandemente.

La metodología nombrada toma como base las investigacio

nes realizadas por la Misión Japonesa en Chimbote (Mori-moto, et.al., 1971), también toma en cuenta la actualización en algunas técnicas como las habidas en Dinámica de Suelos. Igualmente en forma paulatina han sido incorporadas consideraciones sobre los fenómenos naturales que suceden en el país como inundaciones, huaicos, avalanchas, erosión, Tsunamis, etc.

La metodología propone, al ser aplicada al Planeamiento Urbano, en cuanto a los asentamientos humanos, que los componentes más importantes, como las zonas residenciales de alta densidad y las zonas industriales de la ciudad de la cual depende la vida económica de la ciudad, se ubican en las áreas de menor riesgo. Las áreas más peligrosas se designan para parques, áreas recreacionales abiertas o algún otro uso apropiado.

Kuroiwa, H. (1983) hace un resumen general sobre los tipos de desastres naturales, que se espera ocurran en las diferentes regiones del Perú y pone énfasis en que es de necesidad investigarlos en detalle para las zonas asignadas para poblaciones, en un planteamiento urbano que debe tomar en cuenta estudios de microzonificación sísmica del área.

El terremoto de 1979 en Arequipa, fué una buena oportu-

nidad para verificar las influencias de las condiciones locales del suelo en la distribución de daños y también para desarrollar un método simple y de bajo costo, prescindiendo de instrumentos sofisticados que pueda ser aplicado de manera extensiva en otras localidades del Perú.

En las poblaciones analizadas en el Departamento de Arequipa se encontró que la mayoría de las edificaciones existentes eran de adobe o quincha, entonces no era necesario usar métodos sofisticados de microzonificación. Por eso se concluyó que solamente era necesario clasificar los suelos de las posibles áreas de expansión, de acuerdo a sus características relativas: Capacidad portante del suelo, nivel de la napa freática, pendiente, etc. y tener en consideración la posibilidad de ocurrencia de fenómenos como Huaycos, deslizamientos, inundaciones, etc.

El autor concluye con que la metodología descrita puede ser usada en la expansión de poblaciones pequeñas y de esa forma, proteger contra desastres un número grande de centros poblados de todo el país.

#### 4.2 DESCRIPCION DEL EQUIPO USADO

En el año 1981, una misión de asesoramiento del Gobierno Japonés donó al Perú el "Microtremor Instrument" (medidor de microtrepidaciones), y a principios de 1983 este aparato estaba a cargo del Comité de Ingeniería Antisísmica de la Universidad Nacional de Ingeniería, el cual permitió gentilmente su utilización en el presente proyecto.

En el diagrama mostrado en la figura 4.2.1. se indica la forma física completa del aparato que consta de una grabadora, un amplificador, una caja de baterías y un lugar para los sensores ("pick ups"). Aparte tiene un accesorio, el "miniwriter", en el cual se registra analógicamente mediante una escala apropiada la onda de microtrepidaciones en un papel milimetrado.

El presente aparato puede registrar tanto desplazamientos como velocidades; en el presente trabajo se utilizó solo desplazamientos, es decir que la amplitud la onda producida era de desplazamientos.

4.2.1 SENSORES .- 0 "Pick ups", son tres, dos para registrar el movimiento horizontal (pueden colocarse

perpendicularmente) y el otro sensor para el movimiento vertical. Dichos sensores se colocan directamente sobre el lugar a medir, y registran el movimiento del suelo en la dirección que se desee por intermedio de un péndulo que se mueve junto con el terreno, registrando la componente del movimiento en la dirección deseada.

4.2.2. AMPLIFICADOR.- Es el cerebro del aparato, con la finalidad de amplificar las señales captadas por los sensores, controla independientemente cada sensor de medición y capta las señales de los sensores simultáneamente. También existe control para el cuarto canal que es para registro de tiempo o comentarios.

4.2.3. GRABADORA.- Es similar a cualquier grabadora común y usa también los cassettes comunes; además de grabar los sonidos y reproducirlos, también hace lo mismo con las ondas salidas del amplificador, es decir, que dichas ondas después de ser grabadas, pueden ser reproducidas analógicamente en el miniwriter de la misma manera como si se hiciera la medición en el momento.

4.2.4. FUENTE DE ENERGIA.- La fuente de energía del aparato puede ser la corriente continua o la corriente alterna, ya que el aparato tiene incorporados transfor

madores especiales. La corriente continúa puede ser producida con una batería de carro o con pilas comunes ( 12 voltios producidos en total). La corriente alterna puede conseguirse utilizando la corriente eléctrica domiciliaria, que produce 220 voltios.

4.2.5. MINIWRITER.-Del manual del miniwriter se ha obtenido la figura 4.2.3. de la cual se puede obtener una idea de su funcionamiento. Este accesorio puede registrar la onda en el momento mismo de la medición y también posteriormente al reproducir la onda registrada en la grabadora.

4.2.6. CALIBRACION.-Antes de proceder a la medición, es necesario un proceso de calibración, es decir adecuar el aparato a las condiciones de sensibilidad necesarias. Dicha calibración debe efectuarse tanto en el amplificador como en el miniwriter. En el amplificador, la calibración se efectúa en -54 decibeles de atenuación para desplazamientos o velocidades y para cada canal.

También existe un conmutador para frecuencia natural del sensor que puede indicar 1 seg. ó 5 seg.. En este caso - se trabajó con 1 seg.

En el miniwriter debe adecuarse la amplitud medida a una

escala tal, que permita que la onda pueda ser dibujada en el papel, esto se realiza con el botón "Gain".

4.2.7. MEDICION.- Una vez que se tienen los sensores dispuestos en el terreno, interconectados con todo el aparato, y este debidamente calibrado, se efectúan los ajustes necesarios para proceder a la medición que puede realizarse teniendo el miniwriter funcionando si - multáneamente y también puede grabarse la medición.

En el amplificador, en el lugar para cada canal, se regula la atenuación que puede ser de:

(-) 0, 6, 14, 20, 26, 34, 40, 46, 54, 60 decibeles  
(db).

En el miniwriter, según la figura 4.2.3, los rangos de medición pueden estar en: 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 mv/cm (milivoltios/centímetro). Estas unidades se tienen de acuerdo a condiciones propias del aparato. Los rangos para la velocidad del movimiento del papel, son de 1, 2.5, 5, 10, 25, y 50 mm/seg. De acuerdo a esto se puede obtener la equivalencia para el eje de las abcisas.

Una vez que se escoge las unidades apropiadas, se procede a la medición durante un tiempo determinado, evitando interferencias en el lugar donde están dispuestos los sensores.

#### 4.2.8. EQUIVALENCIAS PARA AMPLITUDES

##### 1) Miniwriter

De los rangos de medición se obtiene:

$$1000 \text{ mv/cm} = 1 \text{ v/cm} = 1 \text{ cm/volt.}$$

$$500 \text{ mv/cm} = 0.5 \text{ v/cm} = 2 \text{ cm/volt.}$$

$$200 \text{ mv/cm} = 0.2 \text{ v/cm} = 5 \text{ cm/volt.}$$

##### 2) Amplificador

Del manual del "Microtremor Instrument" se obtiene lo siguiente:

Sensitividad.- Al medir desplazamientos en movimiento horizontal o vertical, se tiene las siguientes equivalencias para las frecuencias naturales:

$$1 \text{ seg (de frecuencia)} : 5 \text{ v}/\mu \text{ (voltios/micrón)}$$

Siempre se trabajó con 1 seg. de frecuencia natural.

Los valores reales de amplitudes dependen del nivel de atenuación, y la tabla siguiente con los factores de conversión, es característica para este tipo de instrumentos, (W. Taniwangsa, 1981).

ATENUACION (db)	MAGNIFICACION	EQUIVALENCIA
0	1	5v/ $\mu$ = 0.2 $\mu$ /volt.
6	2	0.4 "
14	5	1. "
20	10	2. "
26	20	4. "
34	50	10. "
40	100	20. "
46	200	40. "
54	500	100. "
60	1000	200. "

De las dos tabulaciones anteriores se puede obtener un resultado:

Equivalencias en  $\mu$ /cm (Micrones/centímetros)

Atenuación \ Rango	1000 mv/cm	500 mv/cm	200 mv/cm
0 db	0.2	0.1	0.04
6 "	0.4	0.2	0.08
14 "	1.	0.5	0.2
20 "	2.	1.	0.4
26 "	4.	2.	0.8
34 "	10.	5.	2.

Mediante esta tabla, los valores del eje de las ordenadas de la onda de microtrepidaciones (desplazamientos), se pueden convertir a sus valores absolutos en micrones.



Estos valores numéricos los cuales no son continuos, sino que se obtienen cada cierto intervalo, se llaman valores discretos del valor continuo. El proceso de lectura o determinación de estos valores a partir de la curva continua, se denomina digitación.

Ambos métodos, análisis analógico y análisis digital, tienen cada uno sus ventajas y desventajas. En el análisis espectral de ondas sísmicas, históricamente el análisis analógico es superior, pero desde el punto de vista de precisión de análisis, el análisis digital es mucho mejor. Aquí se usará este tipo de análisis digital.

De la figura 4.3.1 (b), si el tiempo de duración de la onda es  $T$  y el intervalo de tiempo es  $\Delta t$ , el número total de puntos discretos es  $T/\Delta t$ . La precisión de este análisis es mejor, cuando el intervalo de tiempo se hace más pequeño; usualmente en ondas sísmicas,  $\Delta t=0.01$  seg. Para realizar la digitación se usan equipos especiales y los resultados pueden ser impresos en tarjetas, cintas magnéticas, etc. Para los cálculos posteriores es recomendable el uso de la computadora.

Las mediciones de microtrepidaciones objeto del presente trabajo se realizaron aproximadamente durante 5 minu

tos en cada lugar, parte de las cuales se registraron directamente en el "Miniwriter". Simultáneamente, todas las mediciones fueron grabadas y se conservan en cassettes. Para el análisis se escogió una parte del registro de aproximadamente 512 datos como mínimo, para tener la posibilidad de realizar posteriormente otros tipos de análisis de ondas, como el espectro de Fourier, que necesita datos que sean potencias de 2.

Se obtuvo en la mayoría de los casos el registro analógico en el miniwriter a una velocidad de 50 mm/seg.

Se vió por conveniente escoger para la digitación un intervalo  $\Delta t = 0.02$  seg., lo que garantizaba la precisión del caso. Previamente se escogió una línea base que pase convenientemente a lo largo del tren de ondas.

Todas las variantes de digitación usadas, se resumen en el siguiente cuadro.

Velocidad	$\Delta t$ escogido	T digitado	N <sup>o</sup> de datos digitado
50 mm/sg	0.02sg=1mm	10.24 sg.	512
	0.01sg=.5mm	5.12 sg.	512
10 mm/sg	0.1 sg=1mm	51.2 sg.	512

La digitación se realizó en la dependencia "Estudios Analíticos" de ELECTROPERU que gentilmente facilitó su Digitizador. Los resultados fueron impresos en tarjetas para su posterior análisis en la computadora de la UNI.

#### 4.3.2. CORRECCION DE LA LINEA BASE

Usualmente el registro original del acelerograma o cualquier onda sísmica, presenta desviaciones incidentales de la línea base. Por eso cuando se integra por ejemplo en un acelerograma, la aceleración para obtener velocidades y desplazamientos, se tiene que la velocidad final no se elimina y el desplazamiento permanente se hace irrazonablemente largo. Para corregir esta línea base o línea cero existen varios métodos en que primeramente la línea base temporaria se mueve una cierta cantidad en dirección paralela a ella, y luego se rota de acuerdo a las condiciones finales o de frontera. (Ohsaki, 1972).

Y. Ohsaki en 1972 propone su "Correction of Earthquake Accelerogram", método, como su nombre lo indica, para corregir la línea base de acelerogramas. Este método -

puede aplicarse también a los registros tiempo-historia de desplazamientos, tal como las ondas obtenidas de un registro de microtrepidaciones. Estos últimos registros presentan también desviaciones incidentales de la línea base, por lo tanto, necesitan también su corrección.

El análisis de la onda de microtrepidaciones utilizó el programa de cómputo CRAC, desarrollado por Ohsaki para corregir la línea base con resultados óptimos. La corrección se realizó a partir de los datos de digitación, adecuados convenientemente al programa de cómputo disponible, (Ohsaki, 1972).

Como un ejemplo se presenta la figura 4.3.2, en la que se indica esquemáticamente en una pequeña porción de registro la corrección de la línea base.

#### 4.3.3. ESPECTRO DE FRECUENCIA-PERIODO

##### METODO DE CRUCE DE LA LINEA BASE (ZERO-CROSSING)

En la figura 4.3.3. se muestra una curva sinusoidal  $f(t)$  que tiene un período  $T = 0.25$  seg. Matemáticamente esto se expresa como  $f(t) = f(t+T)$ .

Es decir, el período ( $T$ ) es el tiempo en que la misma situación aparece repetidamente. De esta definición, es claro que la diferencia entre el tiempo calculado entre un punto cualquiera de la curva (punto máximo, intermedio, cero, etc.) y el siguiente punto que muestra la misma situación, es siempre el período. En este método interesan únicamente los puntos en que la curva cruza la línea base horizontal (puntos cero).

En la figura indicada se observa que la curva cruza el eje horizontal del lado positivo al negativo en el punto C1, y luego en el punto C3, entonces el intervalo de tiempo entre estos dos puntos es el período  $T = 0.25$  seg. Este período es el mismo si la curva cruza el eje horizontal del lado negativo al positivo en los puntos C2 y C4. Cuando la curva cruza el eje horizontal en diferentes direcciones, el intervalo de tiempo entre un punto cero y el siguiente punto cero, como C1, C2, C3, C4, ... es siempre  $T/2$ . Esto quiere decir que el período de la onda se puede calcular como dos veces este intervalo de tiempo. Por consiguiente, este método para calcular el período como dos veces el intervalo de tiempo entre dos puntos que cruzan la línea base (línea cero), se llama "método de cruce de la línea base" (Zero crossing method). (W. Taniwangsa, 1983).

Sin embargo, en el caso que la curva no sea una función simple seno o coseno, sino más complicada como lo es la onda sísmica, este método no puede aplicarse estrictamente. No obstante, cabe mencionar, que la onda sísmica a pesar de ser bastante complicada, en realidad viene a ser una composición de varias ondas simples de seno y coseno.

En el caso de la distribución frecuencia-período de una onda sísmica, es mucho mejor si el período en el eje horizontal tiene un mismo intervalo expresado en escala logarítmica, porque el rango de períodos es bastante alto. Cada intervalo está representado por un valor significativo, en este caso, el valor medio. En el eje vertical se expresa la frecuencia de cada intervalo de períodos, es decir, el número de veces que se repite cada intervalo de períodos, al analizar una onda.

Como un ejemplo aclaratorio, se aplicará el método de "cruce de la línea base" en el caso de la conocida onda sísmica de "El Centro", (Fig. 4.3.4). Esta onda tiene 62 puntos de cruce (puntos cero) y por consiguiente existen 61 períodos. Los períodos se clasifican según se muestra en la primera columna de la tabla 4.3.1; estos períodos tienen casi el mismo intervalo en la esca-

la logarítmica. La suma de los valores de la segunda columna de esta tabla es 61, que es el número total de frecuencias. Entonces, el porcentaje de la frecuencia de cada clase, con respecto al número total de frecuencias se denomina frecuencia relativa y se muestra en la tercera columna de la tabla. De hecho que la suma de las frecuencias relativas debe ser igual a 100%.

En la figura 4.3.5 se muestra el histograma de la relación entre los períodos y sus frecuencias, y en la figura 4.3.6 se presenta la curva de relación entre los períodos y sus frecuencias relativas. De estas dos figuras se obtiene que la clase que tiene el mayor número de frecuencias, es la de 0.25 seg., a este período se le llama período predominante. Se demuestra entonces que con este método se puede obtener información sobre los períodos que contiene la onda.

Si observamos una vez más la onda de la figura 4.3.3 se nota que en la parte marcada con "A" existen unas ondulaciones pequeñas que tienen período corto y amplitud pequeña. Esta parte se llama "ripple" y no va a cruzar la línea base, por consiguiente no se considera como una componente de períodos. Se deduce entonces que hay una tendencia a no tomar en cuenta los períodos cortos de la onda. Es decir, las componentes de fre -

cuencia baja que tienen períodos largos pasan fácilmente, pero las componentes de frecuencia alta que tienen períodos cortos no pueden pasar. En otras palabras, este método del cruce de la línea base actúa como una especie de filtro de las componentes de frecuencias bajas e ignora las componentes de frecuencias altas. Desde este punto de vista, este es el punto débil del método. Sin embargo, excepto por este punto, el método da las características principales de la onda y por lo tanto no puede dejarse de lado.

El profesor Kanai ha obtenido muchos resultados valiosos aplicando este método en sus investigaciones en el campo de la Ingeniería Sismoresistente. El ha usado este método principalmente en el análisis de ondas de microtrepidaciones. Existe inclusive otro nombre del espectro de frecuencia-período mostrado en la figura 4.3.6, el cual es el espectro de Kanai.

A continuación se indica como puede expresarse cuantitativamente la irregularidad de la onda:

Si :  $N_o$  = Número de puntos de cruce de la línea base que van del lado positivo al negativo.

$N_m$  = Número de picos de la onda.

Entonces, el índice de irregularidad puede expresarse como:

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{N_o}{N_m}\right)^2}$$

Cuando  $N_o = N_m \implies e = 0 \implies$  Es una onda regular.

Cuando  $N_m \gg N_o \implies e \ll 1 \implies$  Es una onda irregular.

Este método (Zero-Crossing) es el usado por la Escuela Japonesa para la clasificación de suelos y para las investigaciones realizadas con las ondas de microtrepidaciones, por lo que fué el método utilizado en el presente trabajo.

En el presente trabajo, primero se realiza la corrección de la línea base de los datos de digitación, después a los datos ya corregidos y adecuados convenientemente, teniendo las amplitudes su valor real en micro - nes, se les aplica el programa de cómputo SPEH preparado por el profesor Ohsaki, para hallar la tabulación frecuencia-período y por consiguiente el espectro frecuencia-período (Ohsaki, 1976).

#### METODO PICO (PEAK METHOD)

Revisando nuevamente la figura 4.3.3, se nota que la

distancia entre P1 y P2, es decir de un punto inferior a otro, o de pico a pico, también representa el período de la onda. Bajo este concepto, se puede contar el número (frecuencia) de ondas con cierto período para cada intervalo de clase, y a pesar de la complejidad de la onda y con la ayuda de métodos estadísticos, se puede determinar el período predominante de la onda en estudio. Este método se llama "método pico".

Usando los mismos valores límites de la tabla 4.3.1 y a manera de ejemplo, se ha determinado la curva frecuencia-período de la onda sísmica de "El Centro" y los resultados se muestran en la figura 4.3.6. Cuando se compara los resultados obtenidos por este método y por el anterior, se nota en general una ligera diferencia, especialmente en la parte izquierda de la onda donde está el rango de los períodos cortos. La razón es que en el método pico se consideran todos los picos de las ondulaciones tipo "ripple". En otras palabras este método tiende a recoger las frecuencias altas y por eso se le puede considerar una especie de filtro de las componentes de frecuencias altas.

En el presente trabajo también se obtuvo para todas las ondas analizadas, la tabulación frecuencia-período por

el método pico, sirviendo como comprobación de lo obtenido por el método anterior. Esto se logró con el programa de cómputo SPEH del profesor Ohsaki, que calcula por ambos métodos la distribución frecuencia-período (Ohsaki, 1976).

#### 4.3.4. ESPECTRO DE DENSIDAD DE PROBABILIDADES

Revisando el cálculo de la frecuencia-período por el método de cruce de la línea base o por el método pico, se notará que únicamente se refiere al tiempo. Se prestó atención únicamente al eje horizontal de tiempo, pero no se consideró la amplitud de la onda.

De manera contraria, la distribución de densidad de probabilidades no está relacionada absolutamente con el tiempo, sino que se refiere a la amplitud de la onda. Hay varias amplitudes en una onda sísmica; en algunos casos pueden aparecer grandes amplitudes a menudo, pero en otros casos, las amplitudes grandes aparecen raramente, solo 1 o 2 ondas, y el resto tiene ondas de amplitudes bastante pequeñas.

El problema no es el tamaño de la amplitud de la onda

en sí, sino la mezcla de varias amplitudes en la onda, es decir, su distribución. En algunos casos existen ondas que oscilan mayormente en el lado positivo y muy poco en el lado negativo. En tal caso se puede decir que la distribución de amplitudes está concentrada en un lado.

Cuando se clasifica la amplitud de la onda en varias clases, el número de amplitudes que pertenecen a un intervalo de clase, o en otras palabras, el número de valores de muestreo de la amplitud da una distribución - que se denomina distribución de densidad de probabilidades.

Podemos entender mejor la idea de la distribución de densidad de probabilidades si nos referimos al gráfico N° 4.3.7. En dicho gráfico, si se pone una pantalla al lado derecho de la onda, supuestamente translúcida y se pone una luz desde el lado izquierdo, la onda hará una sombra en la pantalla, y ésta aparecerá más oscura o más clara dependiendo de la densidad. Si esta densidad es alta, la luz tiene dificultad en pasar, pero si la densidad es pobre, la luz puede ser vista a través de la pantalla, más claramente. Este grado de oscurecimiento representa la densidad de probabilidades.

En la figura 4.3.7 se presenta la onda de "El Centro", que se ha obtenido no de un ploteador, sino de un gráfico mediante asteriscos, en la computadora. Si se cuenta el número de asteriscos en cada línea, se puede estimar la distribución de la densidad de probabilidades. El lado derecho de la figura es un gráfico sombreado que representa el grado de oscuridad de la sombra, dicho gráfico es la curva o espectro de densidad de probabilidades.

La amplitud a indicar en estos casos puede no ser la amplitud original de la onda sino mas bien puede estar normalizada a la unidad. Por eso, estas amplitudes se denominan amplitudes relativas. Entonces las amplitudes relativas entre  $\pm 1$  pueden clasificarse en 21 clases de 0.1 como intervalo de clase tal como se indica en la tabla 4.3.2. Se puede entender fácilmente que las frecuencias que pertenecen a cada clase, es decir la distribución de densidad de probabilidades está expresada en porcentaje. Este resultado se grafica en forma de un espectro de densidad de probabilidades según se muestra en la figura 4.3.8. En general la forma de la curva se asemeja a la forma de la sombra de la figura 4.3.7

El pico de la distribución es una característica impor

tante. Literalmente, el pico de la distribución debe ser el centro geométrico. Hay distribuciones enteramente simétricas pero también hay distribuciones donde el pico no está en el centro. El pico del último tipo de distribución se determina por el valor promedio de los valores considerados.

Otra características importante es la dispersión de la distribución. Hay casos en que los valores de muestreo están concentrados alrededor del pico, en otros casos están alejados del pico. Para expresar esta dispersión - se usa la desviación standar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{n-1} (X_m - \bar{X})^2}{N}}$$

En la tabla 4.3.2 se indican los valores de desviación standar para la onda de "El Centro". Sin embargo, estos valores están normalizados para toda la onda. En este caso  $\sigma = 0.314$  y si lo correlacionamos con los datos originales, siendo la máxima amplitud de la onda de "El Centro" de 326 gals, la desviación standar real es

$$\sigma = 326 \times .314 = 102 \text{ gals.}$$

En la tabla 4.3.2 y en la figura 4.3.8 todas las ampli

tudes están normalizadas según su valor máximo.

Se indicó anteriormente que el espectro de densidad de probabilidades sirve para hallar la amplitud mayor y recordando su definición: promedio de las grandes amplitudes que a menudo aparecen; es decir no se refiere a las máximas amplitudes que muy poco aparecen, sino a las que con más frecuencia se hacen notar que son menores en magnitud. Esto se realizaba en forma óptica, es decir que se conseguía del gráfico de la onda. Se ha notado que el valor de la desviación standar real, es decir la desviación standar normalizada multiplicada por la máxima amplitud de la onda, dá aproximadamente el valor de la amplitud mayor, comprobándose esto en la onda de "El Centro" y en varias ondas de microtrepidaciones corregidas.

El raciocinio anterior se ha empleado para hallar la amplitud mayor en las ondas de microtrepidaciones analizadas en el presente trabajo, haciéndolo mediante un programa de cómputo del profesor Ohsaki, dándole los datos de digitación corregidos, entrega una tabla como la 4.3.2, de la que se obtiene también la desviación standar normalizada (Ohsaki, 1976).

EL CENTRO, CALIFORNIA 1940.5.18 NS

- - METODO DE CRUCE DE LINEA BASE - -

PERIODO (SEG)	FRECUENCIA	FREC. REL. (%)
0.055	1	1.64
0.065	2	3.28
0.075	2	3.28
0.090	5	8.20
0.110	5	8.20
0.135	7	11.48
0.165	4	6.56
0.200	8	13.11
0.245	10	16.39
0.295	4	6.56
0.360	2	3.28
0.450	4	6.56
0.550	4	6.56
0.675	1	1.64
0.825	2	3.28
1.000	0	0.00
1.200	0	0.00
1.450	0	0.00
1.800	0	0.00
2.250	0	0.00

INDICE DE IRREGULARIDAD = 0.779

TABLA 4.3.1

DISTRIBUCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDADES

EL CENTRO, CALIFORNIA 1940.05.18 NS

AMPLITUDES RELATIVAS	DENSIDAD DE PROBABILIDADES
1.0	0.50
0.9	0.75
0.8	0.62
0.7	0.62
0.6	2.37
0.5	2.62
0.4	3.13
0.3	5.12
0.2	8.25
0.1	16.37
0.0	24.62
- 0.1	13.00
- 0.2	4.50
- 0.3	3.62
- 0.4	4.00
- 0.5	4.12
- 0.6	2.87
- 0.7	1.25
- 0.8	0.75
- 0.9	0.87
- 1.0	0.00

VALOR PROMEDIO NORMALIZADA = 0.000

DESVIACION STANDARD NORMALIZADA=0.314

TABLA 4.3.2

#### 4.4 MICROTREPIDACIONES Y PREDICCIÓN DE PERIODOS EN LIMA

##### 4.4.1. INTRODUCCION

Con el objetivo de conocer y calibrar el equipo disponible y poder comprobar la eficacia de la metodología implementada, se realizaron ensayos de microtrepidaciones en algunos puntos de Lima, determinándose los períodos predominantes y el tipo de suelo de Kanai correspondientes. Dichos ensayos se realizaron en Chorrillos (Clínica Chorrillos), Lima (Parque de la Reserva), La Molina (U.N.A.) y en El Callao (Molino Callao) entre los meses de Marzo y Mayo de 1983.

En los puntos medidos donde existía conocimiento de la estratigrafía se realizaron predicciones de períodos predominantes mediante el análisis de propagación unidimensional de ondas para deformaciones pequeñas, encontrándose gran similitud con los períodos medidos por microtrepidaciones correspondientes.

##### 4.4.2. MICROTREPIDACIONES

Las ondas de microtrepidaciones obtenidas en Lima, se muestran en el apéndice I. La tabla 4.4.1 present

ta los resultados de microtrepidaciones en Lima ejecutados por el proyecto ECOSIS. En dicha tabla se presentan la ubicación del punto medido y los períodos predominante, promedio y mayor determinados, así como la clasificación de suelos de Kanai aplicada a dichos resultados.

Las curvas frecuencia-período determinadas para los puntos de medición se presentan en el apéndice II.

#### 4.4.3. AMPLIFICACION SISMICA

Mediante la teoría de propagación unidimensional de ondas con deformaciones pequeñas se pudo predecir los períodos predominantes del suelo en algunos perfiles estratigráficos. La tabla 4.4.2. presenta las ubicaciones y los resultados de períodos predominantes. Los perfiles estratigráficos fueron tomados de estudios geotécnicos disponibles. (Alva Hurtado, 1982), (Ottazzi et.al., 1980), (Michelena, 1978).

En Chorrillos la estratigrafía ha sido simplificada y la ubicación de la roca basal o similar fué supuesta profundizando el último estrato que se presenta en los perfiles disponibles (Alva Hurtado, 1982).

En el Parque de la Reserva, observando la figura 4.4.1.se

aprecia que el terreno consta de un único estrato compacto, se puede suponer la roca basal en la profundidad donde  $V_s \geq 500$  mt/sg. (aproximadamente 11 mts.). Según la teoría de amplificación unidimensional para un único estrato (Ohsaki, 1975) :

$$\text{Período natural.-} \quad T_0 = \frac{4 H}{V_s} = \frac{4 \times 11 \text{ mts.}}{500 \text{ mt/sg.}} \sim 0.09 \text{ seg.}$$

En la zona de La Molina existe un perfil stratigráfico (Ottazzi et.al., 1980) no conociéndose su ubicación exacta (figura 4.4.2). Se procedió a encontrar el período - tomando la amplificación entre la superficie y en la profundidad donde  $V_s \geq 500$  mt/seg. (20 mts.) y también cuando  $V_s \geq 1000$  mt/seg. (44.5 mts.), coincidiendo este último resultado con el obtenido en el estudio anterior, según se aprecia en la figura 4.4.2.

En el Molino Callao fué necesario asumir algunos valores respecto al perfil stratigráfico disponible para predecir el período predominante ya que anteriormente se realizó la prueba del Cono de Peck, no así la prueba de penetración standard (Michelena, 1978).

De la comparación de resultados, observando las tablas 4.4.1 y 4.4.2., se puede comprobar que existe bastante -

similitud entre los valores del período predominante me dido por microtrepidaciones y aquellos determinados por la teoría de amplificación unidimensional para deformaciones pequeñas en los mismos puntos. Los datos de son dajes y los espectros de amplificación obtenidos en la computadora para el área de Lima se presentan en el a péndice III.

#### 4.4.4. CONCLUSIONES

- 1) En la zona de la Clínica Chorrillos el período predominante es  $T_0 = 0.09$  seg. de acuerdo al resultado obtenido del presente estudio tanto por microtrepidaciones como por la Teoría de Amplificación Unidimensional. Este resultado coincide con el obtenido en estudios anteriores (Villanueva, 1975), lo que comprue ba su veracidad.

El tipo de suelo de acuerdo a Kanai obtenido en el lugar referido es I-II, que coincide aproximadamente con el tipo de suelo observado del estudio geotécnico correspondiente (Alva Hurtado, 1982).

- 2) En el Parque de la Reserva el período predomi

nante es  $T_0 = 0.09$  seg., resultado obtenido tanto por microtrepidaciones como por la Teoría de Amplificación Unidimensional. En estudios anteriores se obtuvo igualmente dicho resultado, (Ottazzi et.al., 1980).

El suelo de acuerdo a Kanai obtenido en el Parque de la Reserva es de tipo I. Este resultado se comprueba apreciando la estratigrafía del lugar (Fig. 4.4.1).

- 3) La estratigrafía en La Molina (U.N.A.) es mayormente errática, lo que produce una variación irregular de períodos predominantes. Los puntos medidos de microtrepidaciones en la U.N.A. distan aproximadamente 400 mts., observándose diferencias en el período predominante en uno y otro lugar. El período obtenido en el Edificio de Ciencias por microtrepidaciones coincide aproximadamente con el obtenido en el perfil estratigráfico por amplificación sísmica, asumiendo la roca basal a 44.5 mts. ( $T_0 = 0.36$  seg.).
- 4) En el Molino Callao existe también coincidencia de los períodos predominantes obtenidos -

por ambos métodos ( $T_0 \approx 0.165$  seg.). El tipo de suelo obtenido por microtrepidaciones es aproximadamente concordante con el observado en los perfiles estratigráficos disponibles.

- 5) Los resultados obtenidos en los puntos de medición de Lima en el presente estudio son satisfactorios y permitieron alcanzar los objetivos planeados. Se recomienda efectuar mayor número de ensayos de microtrepidaciones en el área de Lima, lo que sería útil para un futuro estudio de microzonificación sísmica en esta capital.

TABLA 4.4.1

## RESULTADOS DE MICROTREPIDACIONES EN LIMA - ECOSIS - UNI (1983)

PUNTO	UBICACION	PERIODOS (segs)			Amplitud Mayor ( $\mu$ )	TIPO DE SUELO (KANAI)		
		Predominante (To)	Promedio (Tm)	Mayor (Tl)		Diagrama I	Diagrama II	Final
1	E-0 Clínica Chorrillos	0.090	0.121	0.675	0.148	I-II	I-III	I-III
	N-S Clínica Chorrillos	0.090	0.138	0.825	0.147	II	I-III	I-III
2	E-0 Clínica Chorrillos	0.05/0.135	0.122	0.450	0.208	I	I-III	I-III
	N-S Clínica Chorrillos	0.090	0.171	0.825	0.150	I-II	I-III	I-III
3	E-0 Parque de la Reserva	0.090	0.105	0.450	0.024	I	I	I
	N-S Parque de la Reserva	0.090	0.114	0.360	0.020	I	I	I
4	E-0 Parque de la Reserva	0.055	0.102	0.295	0.024	I	I	I
	N-S Parque de la Reserva	0.090	0.090	0.450	0.024	I	I	I
5	E-0 U.N.A. Edificio de Ciencias	0.360	0.158	0.550	0.080	I-II	I-III	II
	N-S U.N.A. Edificio de Ciencias	0.245	0.220	1.450	0.120	IV	I-III	II
6	E-0 U.N.A.-Ex.Zona Andina	0.110	0.175	0.675	0.131	I-II	I-III	I-II
	N-S U.N.A.-Ex.Zona Andina	0.110	0.216	0.825	0.132	II	I-III	I-II
7	E-0 Molino Callao	0.135	0.196	1.000	0.142	II-III	I-III	II
	N-S Molino Callao	0.165	0.200	0.825	0.137	II	I-III	II

TABLA 4.4.2

RESULTADOS DE PERIODOS PREDOMINANTES POR AMPLIFICACION SISMICA

- Sondajes en el área de Lima.

PUNTO	UBICACION	PERIODOS (MODOS DE VIBRACION) (sgs.)		
		1	2	3
	<u>CHORRILLOS</u>			
S2	Clínica Chorrillos	0.093		
S4	Clínica Chorrillos	0.098		
S5	Clínica Chorrillos	0.077		
S6	Clínica Chorrillos	0.084		
S7	Clínica Chorrillos	0.093		
S8	Clínica Chorrillos	0.083		
	<u>LIMA</u>			
1	Parque de la Reserva	0.09		
	<u>LA MOLINA</u>			
2	La Molina (capa base a 20 mt.) (Vs=550 mt/seg.)	0.296	0.107	0.062
3	La Molina (capa base a 44.5mt)(Vs=1,180 mt/seg.)	0.365	0.147	0.099/ 0.065
	<u>CALLAO</u>			
C1	Molino Callao	0.164	0.069	
C5	Molino Callao	0.166	0.056	

## CAPITULO V

### ESTUDIO DE MICROTREPIDACIONES EN CIUDADES DEL DEPARTAMENTO DE ANCASH

#### 5.1 INTRODUCCION

En los meses de Julio y Agosto de 1983, un equipo de trabajo de la Universidad Nacional de Ingeniería, realizó trabajos de campo en el área de Chimbote y Huaraz como parte del proyecto SISRA-ECOSIS, patrocinado por el CERESIS, con el apoyo de CORDE-ANCASH.

Los trabajos nombrados incluyeron mediciones de microtrepidaciones complementarias a las efectuadas por la Misión Japonesa en 1970 en Chimbote y por la Comisión de Reconstrucción y Rehabilitación de la Zona Afectada (CRYRZA) en 1971 en Huaraz. Se ubicaron en planos catastrales los lugares de observación tratando de distribuirlos regularmente. Seguidamente se reconoció los sitios elegidos y se ubicó en definitiva los puntos de medición. Las observaciones de microtrepidaciones se realizaron mayormente durante el día, evitando la interferencia del tráfico de vehículos y el tránsito de peatones. El tiempo mínimo de registro y grabación fué de 5 minutos.

Además, en la ciudad de Chimbote, en base a perforacio -

nes geotécnicas existentes, mediante el análisis de propagación unidimensional de ondas, pudo predecirse los períodos naturales del suelo, encontrándose bastante similitud entre los valores predichos del período natural y aquellos medidos por microtrepidaciones en puntos cercanos.

## 5.2 ESTUDIO EN CHIMBOTE

El mapa de ubicación de sondajes y microtrepidaciones - (P.5.1) distingue las perforaciones ejecutadas por la Misión Japonesa (Morimoto et.al., 1971) y las posteriores, que han sido compiladas en esta investigación (Michelena y asociados, 1971), (Alva Hurtado, 1982), (Carrillo, 1974), (Jacobs P., 1974), (Michelena y asociados, 1974), (Livesey and Henderson, 1973), (LAGESA, 1974). Igualmente se distingue en dicho mapa los ensayos de microtrepidaciones ejecutadas por la Misión Japonesa (Morimoto et.al., 1971) y los ejecutados en este proyecto.

Se presentan en este trabajo los valores de períodos medidos por microtrepidaciones y aquellos predichos mediante la utilización de la teoría de propagación unidimensional de ondas en conjunción con perfiles estratigráficos existentes.

5.2.1. Microtrepidaciones.- Las ondas de microtrepidaciones obtenidas del graficador se muestran en el apéndice I, a dichos registros se les aplicó el análisis de ondas descrito anteriormente.

La Tabla 5.1 presenta los resultados de microtrepidaciones en Chimbote ejecutados por la Misión Japonesa. En di

cha Tabla se presentan la ubicación del punto de medición y los períodos predominante, promedio y mayor determinados en el análisis con el método del cruce de la línea base, así como la clasificación de suelos de Kanai presentada en el capítulo II aplicada a dichos resultados.

Por otro lado, la Tabla 5.2 presenta los resultados de microtrepidaciones en Chimbote ejecutados en este proyecto.

Se ha utilizado la metodología presentada para obtener los períodos predominante, promedio y mayor y la amplitud mayor de las microtrepidaciones. El tipo de suelo se determinó con la clasificación de Kanai presentada. Las curvas período-frecuencia determinadas para los puntos de medición de microtrepidaciones se presentan en el apéndice II.

5.2.2. Amplificación Sísmica.- Se utilizó la teoría de propagación unidimensional de ondas con deformaciones pequeñas en algunos perfiles estratigráficos de Chimbote para predecir los períodos predominantes del suelo. La Tabla 5.3 presenta las ubicaciones y los resultados de períodos predominantes utilizando la teoría

unidimensional de propagación de ondas. Se ha realizado los cálculos para los sondeos de la Misión Japonesa y los sondeos realizados posteriormente con los programas de cómputo presentados en el Centro de Cómputo de la UNI. La estratigrafía ha sido simplificada, localizando en la mayoría de los casos la profundidad de la roca basal a los 25 metros. En el apéndice III se presentan los datos de sondeos y los resultados de espectros de amplificación para Chimbote.

De la comparación de resultados se puede comprobar que existe bastante similitud entre los valores del período predominante medido por microtrepidaciones y aquellos determinados por la teoría de propagación unidimensional de ondas para deformaciones pequeñas. En base a dicha similitud se han combinado los resultados de mediciones y predicción de períodos predominantes para elaborar el mapa de distribución de períodos en Chimbote, Mapa P.5.2. También se presenta un mapa de clasificación de suelos de acuerdo a Kanai, Mapa P.5.3, que incorpora todos los resultados disponibles de microtrepidaciones.

### 5.2.3 CONCLUSIONES

- 1) En Chimbote existe una buena similitud entre el primer pico de las curvas fre-

cuencia-período de ensayos de microtrepidaciones y el período predominante obtenido del análisis de propagación de ondas en el mismo punto.

Puede interpretarse que la existencia de varios picos en las curvas frecuencia-período de microtrepidaciones se debe a que las rigideces de los estratos del terreno son irregulares.

- 2) Las pequeñas diferencias entre los períodos predominantes de microtrepidaciones y el análisis de propagación de ondas en puntos cercanos puede deberse a la suposición de la ubicación de la roca basal en Chimbote.
- 3) En el caso en estudio se recomienda llevar a cabo, especialmente en la zona sur de Chimbote, estudios complementarios para determinar una microzonificación más precisa. Estos estudios son: mayor número de ensayos de microtrepidaciones, ensayos geosísmicos de refracción y estudios de localización de la

roca base.

- 4) La ciudad de Chimbote puede dividirse - en tres zonas: la zona norte donde el período predominante tiene un rango de 0.1 a 0.25 segundos: la zona centro que cubre una gran área con períodos predominantes de 0.3 segs., y la zona sur donde existe una variación irregular de los períodos predominantes.(Mapa P.5.2).

TABLA 5.1.

RESULTADOS DE MICROTREPIDACIONES EN CHIMBOTE - MISION JAPONESA (MORIMOTO et.al., 1971)

PUNTO	UBICACION	PERIODOS (segs)			TIPO DE SUELO (KANAI)
		Predominante (To)	Promedio (Tm)	Mayor (Tl)	
1	Plaza de Armas	0.24		0.66	
3	Urb. La Caleta	0.09		0.41	
4	Urb. La Caleta	0.09		0.84	
5	Urb. La Caleta	0.15		1.06	
6	Cerca de Sogesa	0.15	0.227	0.96	II-III
7	Cerca antena TV	0.28/0.90		1.71	
10	Villa María	0.18/0.60		3.56	
		0.93/1.35			
13	San Pedro	0.09	0.200	1.20	III-IV
15	Jr. Unión-Cdra.6	0.33	0.430	1.23	III-IV
16	Jr. Unión-Cdra.1	0.27	0.400	1.53	IV
19	Panamericana Sur (Pozo 4)	0.27	0.320	1.26	III-IV
20	Jr. Ica-Alto Perú (Pozo 3)	0.28	0.350	1.20	III-IV
21	G.U.E. San Pedro	1 0.28	0.430	2.00	IV
	Miramar Baja	2 0.33	0.320	1.16	III
24	Villa María	0.22	0.491	2.10	IV

TABLA 5.2.(a)

RESULTADOS DE MICROTREPIDACIONES EN CHIMBOTE - ECOSIS - UNI (1983)

PUNTO	UBICACION	PERIODOS (segs.)			Amplitud Mayor ( $\mu$ )	TIPO DE SUELO (KANAI)		
		Predominante (To)	Promedio (Tm)	Mayor (Tl)		Diagrama I	Diagrama II	Final
1 - E-0	Hospital Regional (Este)	0.680	0.985	2.250	0.090	IV	II	IV
N-S	Hospital Regional (Este)	0.820-1.0	0.954	2.250	0.130	IV	II	IV
2 - E-0	Buenos Aires-Panamericana y Huaraz	0.090	0.130	0.675	0.050	I-II	I	II
N-S	Buenos Aires-Panamericana y Huaraz	0.090	0.150	0.825	0.050	II	I	II
3 - E-0	Villa María	0.300-0.36	0.394	2.250	0.185	IV	II	IV
N-S	Villa María	0.245	0.226	1.450	0.125	IV	I-II	IV
4 - E-0	27 de Octubre	0.090	0.154	0.450	0.350	I-II	II	II
N-S	27 de Octubre	0.090	0.140	0.550	0.330	I-II	II	II
5 - E-0	Zona Pantano	0.110	0.127	0.450	0.200	I	I-II	II
N-S	Zona Pantano	0.250	0.210	0.550	0.150	I-II	II	II

TABLA 5.2.(b)

RESULTADOS DE MICROTREPIDACIONES EN CHIMBOTE - ECOSIS - UNI (1983)

PUNTO	UBICACION	PERIODOS (segs.)			Amplitud Mayor ( $\mu$ )	TIPO DE SUELO (KANAI)	
		Predominante (To)	Promedio (Tm)	Mayor (Tl)		Diagrama I	Diagrama II Final
6 -E-0	"El Trapecio"	0.135/ 0.295	0.202	1.000	0.391	II-III	II-III
7 -E-0	"El Trapecio"	0.295	0.348	1.800	0.355	IV	II-III
8 -E-0	"El Acero" Olaya y Peña.	0.165/0.245	0.240	1.200	0.227	III	II III
9 -E-0	"El Acero" Entre Manzanas E y F	0.245/ 0.36	0.206	0.675	0.438	I-II	II-III
10 -E-0	La Caleta-Av.Pardo	0.245	0.200	0.450	0.804	I-II	III
11 -E-0	Siderperú	0.090	0.128	0.675	0.253	I-II	II
12 -N-S	Siderperú	0.098	0.151	1.800	0.349	IV	II

TABLA 5.3

RESULTADOS DE PERIODOS PREDOMINANTES POR AMPLIFICACION  
SISMICA

A) Sondajes Misión Japonesa - Chimbote.

Punto	Ubicación	Períodos (Modos vibración)(sgs)		
		1	2	3
1	Cerca de Sogesa-Av.Industrial	0.276	0.102	0.068
2	6ta.cdra.Calle "Garcilaso de la Vega"	0.273	0.092	0.056
3	Alto Perú -Jr. Ica	0.311	0.103	0.071
4	Panamericana Sur	0.286	0.095	0.057
5	Bnos.Aires-Panam. y Huaraz	0.286	0.095	0.057
7	Miramar Baja	0.290	0.099	0.061
8	La Caleta-Marítimo Pesquero	0.257	0.096	0.057
10	Miraflores-2da.zona-Callao y Pardo	0.274	0.107	0.060
11	27 Octubre-Av."Los Pescadores"	0.293	0.100	0.060
12	Zona alta-Bnos.Aires	0.277	0.091	0.054
13	Miramar-Esc. "Repúb.Francia"	0.271	0.098	0.066
15	"Pensacola"	0.273	0.092	0.056
17	Av. Pardo Miraflores Alto	0.249	0.087	0.058

B) Sondajes Posteriores - Chimbote.

Punto	Ubicación	Períodos (Modos-vibración)(sgs.)		
		1	2	3
Z-24	Buenos Aires	0.351	0.117	0.070
F-7	Buenos Aires	0.322	0.108	0.065
O-7	Buenos Aires	0.309	0.103	0.062
R-6	Buenos Aires	0.331	0.110	0.066
I-9	Buenos Aires	0.287	0.096	0.058
E-3	Buenos Aires	0.322	0.107	0.064
S1	Caja de Ahorros	0.248	0.086	0.055
S3	Caja de Ahorros	0.240	0.091	0.060
102	SiderPerú	0.244	0.083	0.052
124	SiderPerú	0.219	0.083	-
204	SiderPerú	0.235	0.081	-
P2	Trapecio Sur	0.270	0.097	0.058
P13	Trapecio Sur	0.280	0.110	0.064
P3	Mercado Mayorista-proyecto	0.201	0.085	0.050
P10	Mercado Mayorista -proyecto	0.213	0.076	-
P20	Mercado Mayorista -proyecto	0.251	0.088	0.059
B1	La Caleta	0.132	0.067	-
W1	La Caleta	0.079	-	-

### 5.3 ESTUDIO EN HUARAZ

El mapa P.5.4 de ubicación de sondajes y microtrepidaciones distingue los ensayos de microtrepidaciones ejecutados por CRYRZA en 1971 (Armas, 1973) y los ejecutados por la UNI en este proyecto.

Cabe recalcar que en Huaraz no pudo realizarse la aplicación de la teoría de propagación de ondas para predecir períodos fundamentales del suelo, porque no se encontró ningún estudio Geotécnico que incluya pruebas de Penetración Standard o medición de Velocidad de Ondas de Corte en Huaraz.

5.3.1. Microtrepidaciones.- Las ondas de microtrepidaciones obtenidas en Huaraz se muestran en el apéndice I, aplicándoseles también, el análisis de ondas descrito anteriormente.

La tabla 5.4 presenta los resultados de microtrepidaciones en Huaraz ejecutados por CRYRZA. En dicha tabla se presenta la ubicación del punto de medición y los períodos predominante, promedio y mayor determinados en el análisis, así como la clasificación de suelos de Kanai aplicada a dichos resultados. Dicha clasificación se realiza

con los períodos obtenidos por el método del cruce de la línea Base (Ohsaki, 1976).

Por otro lado, la tabla 5.5 presenta los resultados de microtrepidaciones en Huaraz, ejecutados en este proyecto. Las curvas frecuencia-período determinadas para los puntos de medición de microtrepidaciones se presentan en el apéndice II.

Combinando los resultados de microtrepidaciones de CRYRZA y del presente trabajo y tomándolos como complementos, se ha elaborado el mapa de distribución de períodos predominantes en Huaraz, presentado en el mapa P.5.5. También, análogamente a lo que se realizó en Chimbote, se elaboró un mapa de clasificación de suelos de acuerdo a Kanai, que incorpora todos los resultados disponibles de microtrepidaciones en Huaraz (Mapa P.5.6.).

En algunos puntos de medición de microtrepidaciones en Huaraz, el tipo de suelo determinado por los dos diagramas de Kanai, difiere en forma considerable; esto puede deberse a diversas causas. Por lo tanto, un raciocinio tiene que hacerse para alcanzar una decisión final, como está indicado en la última columna de las tablas respectivas.

Por ejemplo por el diagrama I de Kanai se obtuvo en algunos puntos que el suelo era de tipo IV. En tales puntos, observando las curvas Frecuencia-Período, se apreció que solo tenían un aislado período alto, y a eso se debía tal resultado. Todos los demás períodos eran considerablemente más bajos, por lo tanto en esos casos, dicha clasificación parecía ser inexacta como lo demostraban las clasificaciones de los suelos por el diagrama II de Kanai y el tipo de suelo en los puntos circundantes. La decisión para el tipo de suelo a considerar en dichos puntos tomó en cuenta el tipo de suelo en los alrededores. (Armas, 1973), (LAGESA, 1972).

### 5.3.2. CONCLUSIONES

- 1) De acuerdo a la forma de las curvas Frecuencia-Período de los ensayos de micro-trepidaciones, puede interpretarse que la mayor parte del área de Huaraz tiene un terreno con estratos de rigidez irregular.
- 2) La distribución de períodos en la zona urbana de Huaraz es irregular. En el Centro de la ciudad se nota una variación de períodos que fluctúan entre 0.1 a 0.3 seg.

Las zonas norte y sur de la ciudad presentan ligeras variaciones y parecen ser más regulares que en el centro, con la lógica discontinuidad del torrente del río Quilcay que atravieza la ciudad. Los mayores períodos ( $T_0 \geq 0.3$  sg.) parecen darse al sur del barrio Pedregal.

- 3) De acuerdo a la clasificación de suelos - de Kanai, en Huaraz parece que solo existen suelos de tipo I y II.
- 4) Es recomendable llevar a cabo estudios complementarios para determinar una microzonificación más precisa, como mayor número de ensayos de microtrepidaciones, especialmente en el centro de la ciudad, estudios geotécnicos con pruebas de penetración standard y ensayos geosísmicos de refracción para complementar el análisis con la aplicación de la teoría unidimensional de propagación de ondas.

TABLA 5.4

RESULTADOS DE MICROTREPIDACIONES EN HUARAZ - CRYRZA ( Armas, 1973)

PUNTO	UBICACION	PERIODOS (segs)			TIPO DE SUELO (KANAI)
		Predominante (To)	Promedio (Tm)	Mayor (Tl)	
1	Barrio Centenario-Jr. Coron go.	0.250	0.232	0.500	II
2	Av. Confraternidad Oeste	0.120	0.129	0.223	I
3	Este de Nicrupampa	0.200	0.200	0.332	I-II
4	Región Agraria-Av. Confra- ternidad O.	0.165	0.194	0.313	I-II
5	"La Soledad"-Jr. Diego Fe- rrier.	0.145	0.154	0.285	I-II
6	Este de Pedregal	0.200	0.220	0.500	II
7	Barrio Pedregal	0.331	0.331	0.665	II
8	Barrio Belén-Jr. M. Luzuria- ga.	0.250	0.274	0.668	II
9	Plaza de Armas	0.250	0.258	0.500	II
10	Barrio Soledad	0.200	0.220	0.332	I-II
11	Barrio Huarupampa	0.250	0.294	1.000	II-III
12	Barrio San Francisco-Av. Ga- marra.	0.250	0.235	0.400	II
13	Estadio Rosas Pampa	0.145	0.154	0.250	I-II
14	Barrio San Francisco-Jr. M. Luzuriaga/	0.230	0.203	0.334	I-II
15	Hotel de Turistas	0.250	0.248	0.284	II

TABLA 5.5.(a)

RESULTADO DE MICROTREPIDACIONES EN HUARAZ - ECOSIS - UNI (1983)

PUNTO	UBICACION	PERIODOS (segs.)			Amplitud Mayor ( $\mu$ )	TIPO DE SUELO (KANAI)		
		Predominante (To)	Promedio (Tm)	Mayor (Tl)		Diagrama I	Diagrama II	Final
1 -E-0	Parque Belén	0.295	0.350	0.825	0.100	II	I-II	I-II
2 -E-0	Parque Bolívar-Av. Bolívar 10ma. Cdra.	0.110	0.261	1.800	0.062	IV	I	II
N-S	Parque Bolívar-Av. Bolívar 10ma. Cdra.	0.135	0.302	1.450	0.200	III	II	II
3 -E-0	Catedral-Plaza de Armas	0.135	0.148	0.550	0.100	I-II	I-II	I-II
N-S	Catedral-Plaza de Armas	0.135	0.170	0.675	0.133	I-II	I-II	I-II
4 -E-0	Norte de Plaza de Armas	0.090	0.110	0.360	0.133	I	I-II	I
N-S	Norte de Plaza de Armas	0.090	0.138	0.825	0.204	II	II	I
6 E-0	Calle San Martín-Detrás del Concejo	0.165	0.314	2.250	0.032	IV	I	II
N-S	Calle San Martín-Detrás del Concejo	0.135	0.394	2.250	0.046	IV	I	II
7 E-0	Av. Bolívar-5ta. Cuadra	0.295	0.201	0.675	0.064	I-II	I-II	I-II
N-S	Av. Bolívar-5ta. Cuadra	0.135	0.171	0.675	0.083	I-II	I	I-II
9 E-0	Calle Huascarán-2da. Cdra.	0.110	0.183	0.825	0.035	II	I	II
10 E-0	Cerca de la "Región Agraria."	0.245	0.465	2.250	0.035	IV	I	I
N-S	Cerca de la "Reg. Agraria"	0.200	0.375	2.250	0.035	IV	I	I

TABLA 5.5.(b)

RESULTADOS DE MICROTREPIDACIONES EN HUARAZ - ECOSIS - UNI (1983)

PUNTO	UBICACION	PERIODOS (segs)		Amplitud Mayor ( $\mu$ )	TIPO DE SUELO (KANAI)		
		Predominante (To)	Promedio (Tm)		Diagrama I	Diagrama II	Final
12 E-0	Barrio Soledad-INAPRO-MEF.	0.200	0.343	0.052	II	I	II
N-S	Barrio Soledad-INAPRO-MEF.	0.245	0.333	0.041	2.250	I	II
13 E-0	Pedregal-C.E.Sta.Rosa Vitervo	0.135	0.349	0.060	1.800	I	II
N-S	Pedregal-C.E.Sta.Rosa Vitervo	0.135	0.252	0.040	1.800	I	II
16 E-0	Nicrupampa-1 cdra.de CISEA	0.09-0.135	0.348	0.022	2.250	I	I
17 E-0	Pedregal-Parque Perú	0.245	0.259	0.070	0.825	I-II	II
N-S	Pedregal-Parque Perú	0.165	0.167	0.073	0.450	I-II	II
18 E-0	Pedregal Alto-Jr.Gavi-no Uribe	0.090	0.230	0.030	1.800	I	I-II
N-S	Pedregal Alto-Jr.Gavi-no Uribe.	0.110	0.127	0.045	0.450	I-II	I-II
19 E-0	C.E. #123.T.G.Fanning	0.245	0.271	0.031	1.800	I	I

## 5.4 COMPARACION CON ESTUDIOS ANTERIORES

### 5.4.1. INTRODUCCION

Los estudios de microzonificación más relevantes realizados anteriormente en las zonas en estudio son: La microzonificación de Chimbote, realizada por la Misión Japonesa en 1970 y la microzonificación de Huaraz realizada por la Subcomisión Técnica CRYRZA en 1971. El presente trabajo ha incorporado los resultados de microtrepidaciones y sondajes de dichos estudios.

En el presente capítulo se realiza una comparación entre el estudio de microtrepidaciones elaborado por la Misión Japonesa en Chimbote y los resultados del presente estudio en la misma ciudad. También se discuten resultados individuales en puntos de medición coincidentes o en puntos cercanos para ambos estudios.

Para la ciudad de Huaraz se realiza una comparación entre las metodologías utilizadas por CRYRZA y por el presente trabajo, en el estudio de microtrepidaciones. Se comparan los valores de los períodos predominantes y tipos de suelos obtenidos en algunos puntos cercanos.

### 5.4.2. COMPARACION EN CHIMBOTE

La microzonificación propuesta para la ciu -

dad de Chimbote por la Misión Japonesa (Morimoto et.al., 1971), tomó en cuenta los siguientes parámetros: geología del área, condiciones de suelo, observaciones de microtrepidaciones, observaciones de Aftershocks (réplicas de sismo), análisis del movimiento del suelo y estudio de distribución de daños en edificaciones después del sismo (mapa P.4.2.)

El mapa de microzonificación sísmica fué elaborado por la Misión Japonesa tomando en cuenta principalmente la Geología y distribución de daños a edificaciones. Se puede afirmar que el trabajo realizado en Chimbote por la Misión Japonesa es quizás la más completa microzonificación hecha en una ciudad del Perú.

De acuerdo al estudio de microtrepidaciones elaborado por la Misión, se llegó al resultado que el área de Chimbote, desde el punto de vista de las propiedades dinámicas de la superficie del suelo, puede ser dividida en tres partes:

Parte Norte - Incluye San Pedro, Sogesa, y la parte de costa adyacente. El período predominante en esta área es aproximadamente 0.1 seg. Esto muestra que la base del suelo en esta área parece ser dura y densa.

Parte Central - La forma de las curvas Frecuencia-Período en esta región es ligeramente más plana que aquellas en la parte norte y los períodos predominantes están en el rango de 0.2 y 0.3 seg. Esto parece mostrar que la superficie del suelo en esta área es un tanto blanda desde el punto de vista dinámico. Esta parte incluye el área de inundación del río Lacramarca, entonces parece que el espesor de la capa aluvial es más grueso que en la anterior.

Parte Sur - Incluye la región de Buenos Aires y conecta un lugar plano arenoso separado por la carretera panamericana, continuando a la costa. Las curvas Frecuencia-Período en esta área muestran varios períodos predominantes, significando esto que las capas superficiales en esta área consisten de múltiples estratos con variaciones en propiedades dinámicas.

La subdivisión anterior ha sido confirmada en este estudio en base a los resultados en Chimbote. El mapa propuesto de distribución de períodos (P.5.2.) y las conclusiones planteadas confirman lo anterior.

Por otro lado en el presente estudio han sido tomados como datos, todas las perforaciones realizadas por la Mi

sión Japonesa, sirviendo los resultados como complemento en el estudio de distribución de períodos.

5.4.2.1. Comparación de resultados individuales en Chimbote.- A continua-

ción se realiza una discusión de resultados de mediciones de microtrepidaciones (tablas 5.1 y 5.2) y análisis de amplificación sísmica (tabla 5.3) en puntos cercanos:

- 1) Punto 2- microtrepidaciones UNI ( $T_0=0.09$  seg, tipo de suelo II) y punto 5- sondaje Misión Japonesa ( $T_1 = 0.286$  seg.,  $T_2 = 0.095$  seg. y  $T_3 = 0.057$  seg.).

Ambos ubicados en la Urbanización Buenos Aires, en el cruce de la Carretera Panamericana y el Jirón Huaraz. Coinciden el período predominante de microtrepidaciones y el período del 2do. modo de vibración del análisis de propagación unidimensional de ondas. La tendencia en dicho lugar es  $T_0 = 0.09$  seg.

De acuerdo al registro de sondaje, el suelo está compuesto de una mixtura grava-arena, resultado concordante con el tipo de suelo hallado por microtrepidaciones (II).

- 2) Punto 19 - microtrepidaciones Misión Japonesa ( $T_0=0.27$  seg. y tipo de suelo III-IV) y punto 4-sondaje Misión Japonesa ( $T_1=0.286$ ,  $T_2=0.095$  seg. y  $T_3=0.057$  seg.). -

Ambos ubicados en la Panamericana Sur. Existe similitud entre el período predominante de microtrepidaciones y el período del primer modo de vibración ( $T_0 \approx 0.28$  seg.).

De acuerdo a la Geología, esta es una zona de pantano; el registro de sondaje muestra un suelo limo-arenoso y nivel freático superficial. Esta descripción tiene similitud con el tipo de suelo determinado por microtrepidaciones (III-IV).

- 3) Punto 20 - microtrepidaciones Misión Japonesa ( $T_0=0.28$  seg. y tipo de suelo III-IV) y punto 3-sondaje Misión Japonesa ( $T_1 =0.311$  seg.,  $T_2=0.103$  seg. y  $T_3=0.071$  seg.).- Ambos puntos ubicados en la zona Alto Perú, Jirón Ica. La tendencia del período predominante es  $T_0 \approx 0.3$  seg. La diferencia en el período predominante por ambos métodos puede deberse a la suposición de la ubicación de la roca basal, tomada de acuerdo con el informe de la Misión Japonesa (Morimoto et.al., 1971).
  
- 4) Punto 1- microtrepidaciones Misión Japonesa ( $T_0=0.24$  - seg.) y punto S3- sondaje Caja de Ahorros ( $T_1=0.24$  seg.,  $T_2=0.091$  seg. y  $T_3= 0.06$  seg.). Ubicados en la Plaza de Armas y a 1/2 cuadra de esta, respectivamente. Existe coincidencia en la determinación del período predomi-

minante para esta zona,  $T_0 = 0.24$  seg.

5) Punto 10- Microtrepidaciones UNI (períodos pico en la curva frecuencia-período de 0.245 seg. y 0.135 seg.) y Punto 5-microtrepidaciones Misión Japonesa ( $T_0 = 0.15$  seg.).- Ambos puntos ubicados en La Caleta. El período predominante del punto 5 tiene un valor - próximo al del segundo pico de la curva frecuencia período del punto 10.

6) Punto 11-Microtrepidaciones UNI ( $T_0 = 0.09$  seg. y tipo de suelo II) y punto 124-sondaje en Sider-Perú ( $T_1 = 0.21$  seg.,  $T_2 = 0.08$  seg.). La similitud se encuentra entre el período predominante de microtrepidaciones y el período del segundo modo de vibración.

El tipo de suelo determinado por microtrepidaciones (II), es concordante con el registro de sondaje que muestra un suelo compuesto principalmente de arena - con algo de arcilla.

#### 5.4.3. COMPARACION EN HUARAZ

La Sub-Comisión Técnica CRYRZA, con posterioridad al sismo de 1970, realizó trabajos en Huaraz con la finalidad de microzonificar su área urbana (Armas, 1973).

Los trabajos incluyeron mediciones de microtrepidaciones, cuyos resultados se presentaron en un mapa. (Mapa P.4.4).

De la delimitación de zonas en el mapa nombrado, sus autores declaran: " Los límites entre las zonas, en la zonificación de períodos predominantes de Huaraz, no es precisa debido a la pobre densidad de los puntos de microtrepidaciones. A pesar de eso, la zonificación de períodos predominantes está de acuerdo más o menos con la Geología e investigación de daños". (Kuroiwa, et.al., 1973).

Se sabe también que el número de puntos de medición de microtrepidaciones no pudo ser mayor debido a que los escombros cubrían gran parte del área en esos días (Armas, 1973).

La delimitación de áreas fué hecha en base a períodos predominantes, siendo esta forma de presentar resultados una óptica diferente a la utilizada en el presente estudio.

Para el actual estudio, los resultados de CRYRZA sirvieron como complemento y pudo proponerse un mapa de distribución de períodos teniendo más elementos de juicio.

Para poder tener una óptica completa para zonificar Huaraz desde el punto de vista de sus períodos predominantes de suelo, es necesario que en el futuro se realicen estu-

dios Geotécnicos que incluyan pruebas de Penetración S - tandard y/o medición de velocidad de Ondas de corte.

5.4.3.1. Comparación de resultados individuales en Huaraz.- Las curvas frecuencia-período de microtrepidaciones elaboradas por CRYRZA fueron obtenidas en base a períodos medios de vibración cada segundo (Armas, 1973). Este trabajo realizado manualmente, tiene la tendencia a encontrar períodos predominantes mayores que los obtenidos con la metodología utilizada en el presente trabajo. A continuación se realizará una ligera discusión de resultados individuales en puntos cercanos (tablas 5.4 y 5.5).

1) Punto 9-CRYRZA ( $T_0=0.25$  seg. y tipo de suelo II) y punto 3-UNI ( $T_0=0.135$  seg. y tipo de suelo I-II). Ambos puntos ubicados en la Plaza de Armas. El período predominante determinado por CRYRZA es mayor, aunque pueden estar ambos puntos en una zona de variación irregular de períodos, como parecen indicar los resultados en puntos circundantes.

El tipo de suelo encontrado en ambos puntos de medición, es similar. (Tipo II y tipo I-II).

2) Punto 2-CRYRZA ( $T_0=0.12$  seg. y tipo de suelo I) y punto

19-UNI ( $T_0=0.245$  y tipo de suelo I). Ubicados a 2 -  
cuadras de distancia en el barrio Patay en una zona  
de variación marcada de períodos (mapa P 5.5), pero  
el tipo de suelo es el mismo.

- 3) Punto 12-CRYRZA ( $T_0= 0.25$  seg. y tipo de suelo II) y  
punto 7-UNI ( $T_0=0.295$  seg. y tipo de suelo I-II). U-  
bicados a dos cuadras de distancia en el barrio San  
Francisco. Existe similitud en los valores de pe-  
ríodos predominantes y también en el tipo de suelo.

#### 5.4.4. CONCLUSIONES

- 1) Del fruto del presente trabajo, así como  
de los anteriores trabajos análogos, se  
concluye que la actual técnica descrita  
para ser usada en la microzonificación -  
sísmica de las ciudades, es adecuada pa-  
ra nuestro medio por ser relativamente e-  
conómica, rápida y con resultados dignos  
de crédito.
  
- 2) En Chimbote son notables las similitudes  
entre el estudio de microtrepidaciones -  
de la Misión Japonesa y el estudio comple

mentario y ampliatorio actual, siendo apropiado resaltar que para la reducción de datos se ha usado la misma metodología.

- 3) De la comparación de resultados individuales en Chimbote se comprobó que existe bastante similitud entre los valores del período predominante medido por microtrepidaciones y aquellos determinados por la teoría de propagación unidimensional de ondas en puntos cercanos. Los tipos de suelo determinados por microtrepidaciones están acordes con los registros de sondajes respectivos.
- 4) En Huaraz, el estudio de microtrepidaciones de CRYRZA y el del presente estudio pueden tomarse como complementarios, ya que en conjunto el número de puntos de medición cubre toda el área de la ciudad en forma regular.

En general los períodos predominantes determinados por CRYRZA en Huaraz son algo diferentes a los obtenidos en el presente estudio en puntos cercanos, esto puede deberse a que las metodologías utilizadas en la reducción de datos son también diferentes.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se resume los resultados a los que se ha llegado a través del desarrollo del presente trabajo, en el cual se sigue una metodología en el análisis de las microtrepidaciones y en amplificación sísmica.

Se han tenido algunas limitaciones en el desarrollo del presente trabajo, por el hecho de contar con fondos limitados. No se ha podido realizar perforaciones geotécnicas, por lo que para aplicar el análisis unidimensional de propagación de ondas tuvo que utilizarse solamente estudios geotécnicos existentes en Lima y Chimbote. En la ciudad de Huaraz no se encontró ningún estudio geotécnico, que incluya pruebas de penetración standard o medición de velocidad de ondas de corte, por lo que no pudo realizarse el análisis de amplificación sísmica.

En términos generales se puede afirmar que se han obtenido resultados satisfactorios en el presente estudio que pueden servir de modelo para futuros estudios análogos en otras ciudades del Perú.

## 6.1 CONCLUSIONES

Las mediciones de microtrepidaciones objeto del presente trabajo fueron ejecutadas entre los meses de marzo y noviembre de 1983, realizando inicialmente mediciones preliminares en Lima. En Chimbote y Huaraz se trató de distribuir en forma regular los puntos de medición de microtrepidaciones para complementar las mediciones realizadas en estudios anteriores.

Las conclusiones del presente estudio son las siguientes:

En Lima, el estudio preliminar realizado proporcionó resultados satisfactorios que consistieron en conocer y calibrar el equipo disponible y poder comprobar la eficacia de la metodología implementada. Pudo comprobarse los resultados de períodos predominantes obtenidos en los puntos analizados en estudios anteriores. Los tipos de suelo de Kanai obtenidos en el presente estudio en Lima, se verificaron con los perfiles estratigráficos correspondientes disponibles.

En Chimbote se obtuvo una micro-zonificación aproximada de la ciudad en tres partes, desde el punto de vista de la distribución de períodos predominantes, lo que coinci

de aproximadamente con los resultados de la Misión Japonesa. Según el mapa P.5.2 las zonas obtenidas fueron:

Zona Norte-Rango de períodos de 0.1 a 0.25 segs.

Zona Centro- Períodos de 0.3 segs. aproximadamente.

Zona Sur- Variación irregular de períodos predominantes.

Los tipos de suelo de Kanai obtenidos en el área de Chimbote muestran buena concordancia con los perfiles estratigráficos de los estudios geotécnicos existentes.

En Huaraz se puede advertir una variación irregular de períodos predominantes en el Centro de la Ciudad en un rango de 0.1 a 0.3 segs. Las Zonas Norte y Sur tienen ligeras variaciones en períodos, predominando el período de 0.25 segs. con un mayor valor de aproximadamente 0.3 segs. De acuerdo a las curvas frecuencia-período, en general el terreno en Huaraz presenta estratos de rigidez irregular. Los períodos predominantes determinados por CRYRZA y por la UNI en puntos cercanos, son un tanto diferentes, quizás debido a las diferencias en las metodologías empleadas para su medición y reducción de datos. Según la clasificación de suelos de Kanai, en Huaraz parece que solo existen suelos de tipo I y II.

Se puede afirmar que todavía quedan algunos aspectos por resolver, en cuanto a la metodología seguida, como:

El número de puntos de medición de microtrepidaciones y su distribución en forma regular en toda el área a medir, no tiene una regla fija pudiendo tener muchas variantes, este es un aspecto importante porque de esto depende la exactitud de los resultados.

Los diagramas de Kanai para clasificación del terreno por microtrepidaciones fueron propuestos en el Japón, basados no solamente en los resultados de mediciones sino también en la distribución de daños sísmicos en casas de madera tradicionales; es decir, los estudios estuvieron orientados a ese medio; en otros lugares diferentes del Japón como en nuestro país, dichos diagramas deben ser reajustados.

Los datos tomados en Lima y Chimbote para utilizar la teoría de propagación unidimensional de ondas, fueron obtenidos de estudios geotécnicos existentes, de diferentes autores, asumiendo todos los resultados de dichos estudios por lo que la exactitud del presente estudio depende también de la exactitud de los estudios nombrados.

El análisis de propagación unidimensional de ondas se basa en fundadas razones y brinda resultados satisfactorios. Al realizar dicho análisis dinámico de depósitos de suelo como sistema contínuo y para deformaciones pequeñas, los resultados se asemejan a los obtenidos en el análisis de las microtrepidaciones.

De los estudios realizados en Lima y Chimbote, se puede comprobar que existe bastante similitud entre los valores del período predominante medido por microtrepidaciones y los valores determinados por la teoría de propagación unidimensional de ondas para deformaciones pequeñas, en puntos cercanos. Las pequeñas diferencias entre los períodos predominantes obtenidos por ambos métodos en el mismo punto, puede deberse a la suposición de la ubicación de la roca basal. Se puede afirmar que esta comparación puede ayudar también a ubicar aproximadamente la profundidad de la roca basal.

Para poder obtener resultados más exactos al aplicar en nuestro medio la teoría de propagación unidimensional de ondas, quedan algunos aspectos por resolver:

En la mayoría de sondajes analizados en el presente es-

tudio se tomó como datos los valores de N de penetración standard y para hallar el módulo de corte se aplicó la siguiente fórmula empírica obtenida en el Japón:  $G=1200 N^{0.8}$ . A esta fórmula es necesario comprobar su exactitud.

La posición de la roca base en el análisis dinámico fué supuesta en algunos casos, ya que en los estudios geotécnicos disponibles correspondientes la profundidad del suelo analizado era insuficiente.

## 6.2 RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones que pueden ayudar a resolver algunos problemas descritos en las conclusiones, en estudios posteriores.

Para futuros estudios es recomendable tomar en cuenta la Geología del lugar, la topografía, la densidad de población y estudios geotécnicos localizados disponibles, de tal forma de tener una visión panorámica del área a estudiar y poder distribuir los puntos de medición de microtrepidaciones de la forma más provechosa posible.

Si se proyecta emplear la técnica de microtrepidacio -

nes en otras ciudades de nuestro país, sería conveniente verificar la exactitud de los diagramas de Kanai para clasificar los suelos en el Perú. Puede utilizarse también el método de tanteos para verificar dicha exactitud y trabajar preliminarmente en lugares en los cuales sean ya conocidas las características del suelo.

Para poder obtener directamente el valor del módulo de corte lo ideal sería contar con estudios geotécnicos que incluyan mediciones de velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) ( $G = \rho V_s^2$ ). De otro modo, si se tiene valores de N de penetración standard, es recomendable comprobar experimentalmente la veracidad de la fórmula  $G = 1200N^{0.8}$ . Esto puede realizarse con el ensayo de exploración sísmica en algunos lugares donde se cuente con valores de N de penetración standard.

Para obtener la ubicación de la roca basal, es recomendable emplear el método geofísico de prospección por gravedad; también para efectos de análisis dinámico es recomendable realizar estudios geotécnicos lo suficientemente profundos que puedan llegar a la roca basal o a algún estrato duro que pueda tomarse como similar a la roca basal.

En el área de Lima es recomendable efectuar un mayor número de ensayos de microtrepidaciones, lo que sería útil para contribuir a un futuro estudio de microzonificación sísmica en esta capital.

En Chimbote se recomienda realizar estudios complementarios para determinar una microzonificación más precisa, especialmente en la Zona Sur por tener variación irregular de períodos. Los estudios recomendados son: mayor número de ensayos de microtrepidaciones, ensayos geosísmicos de refracción y estudios de localización de la roca base.

En Huaraz, la parte que merece más cuidado, parece ser el centro de la ciudad, tanto por sus antecedentes (su comportamiento durante el sismo del 70), como por los resultados obtenidos en el presente estudio, donde se nota una variación irregular de períodos; por lo tanto son recomendables estudios geotécnicos complementarios, tanto en el centro como en las otras partes de la ciudad. Los estudios recomendados son: sondajes con pruebas de penetración standard y exploración geosísmica.

La aplicación de la técnica descrita para ser utilizada en la microzonificación sísmica de ciudades, es sen

cilla y económica, existe equipo disponible en el país y la metodología y procedimientos de análisis han sido implementados satisfactoriamente en la Universidad Nacional de Ingeniería. Se recomienda su utilización en otras ciudades del Perú.

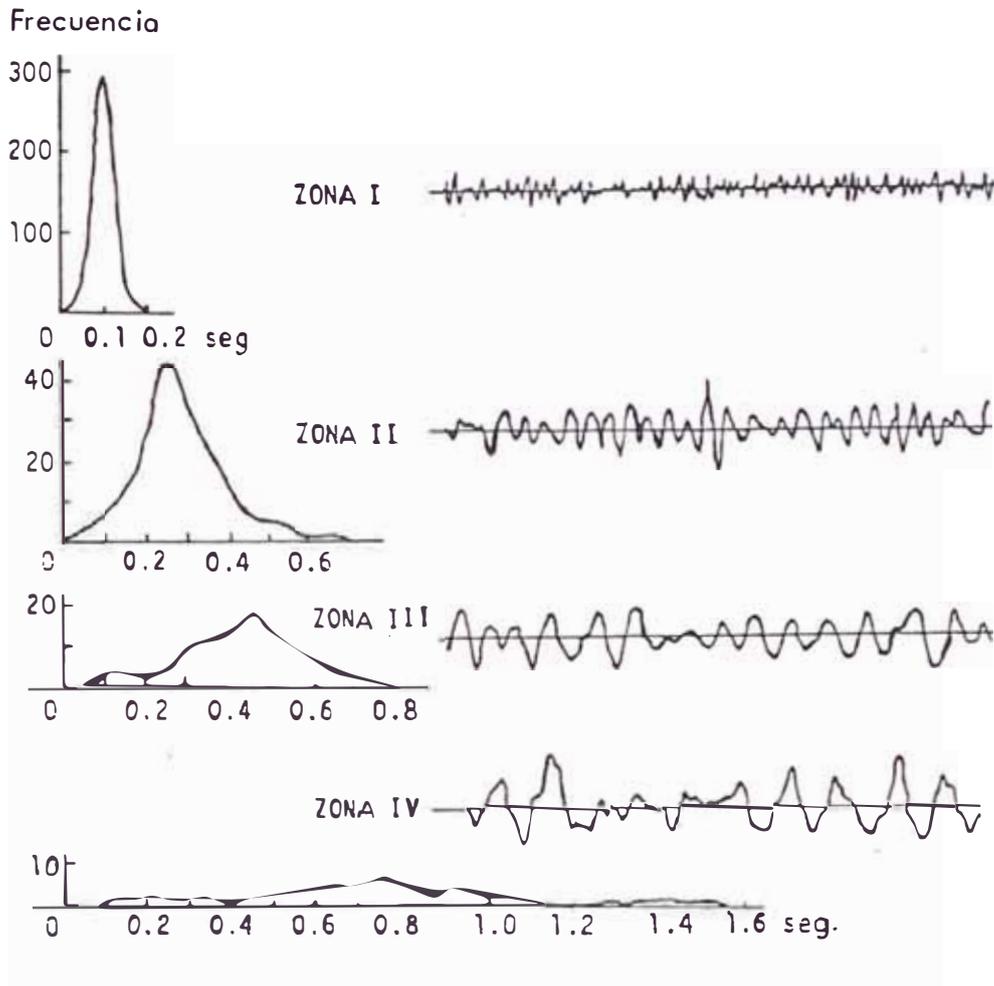


Fig. 2.1. Curvas de distribución de períodos y registros representativos de microtrepidaciones observados en varios tipos de terreno. Los símbolos I, II, III y IV representan los tipos de terreno usados en el código de construcción del Japón.

(Kanai y Tanaka, 1961).

CLASIFICACION DEL SUELO POR MICROTREPIDACIONES

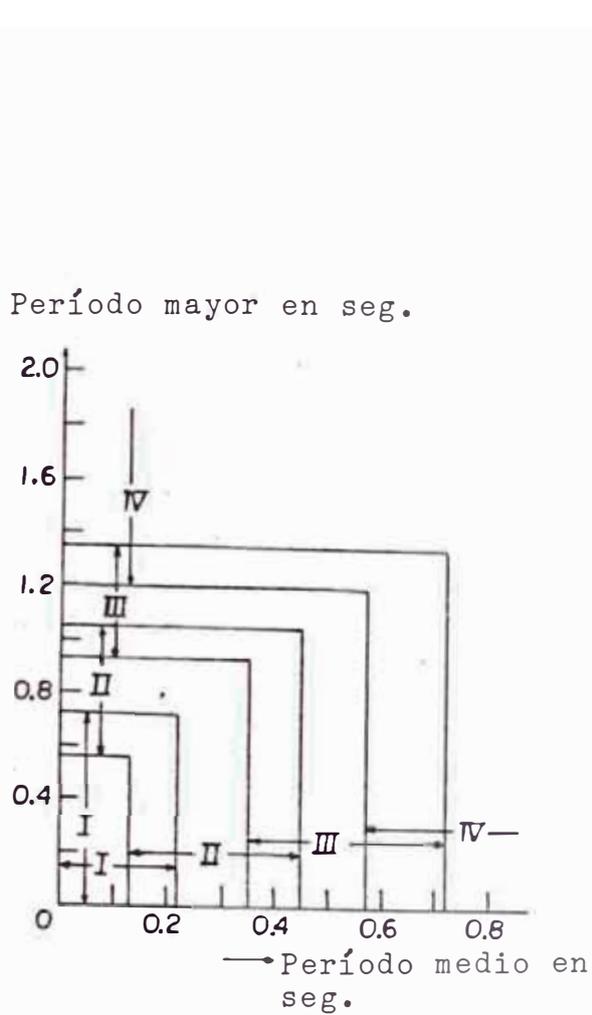


Fig.2.2. DIAGRAMA I

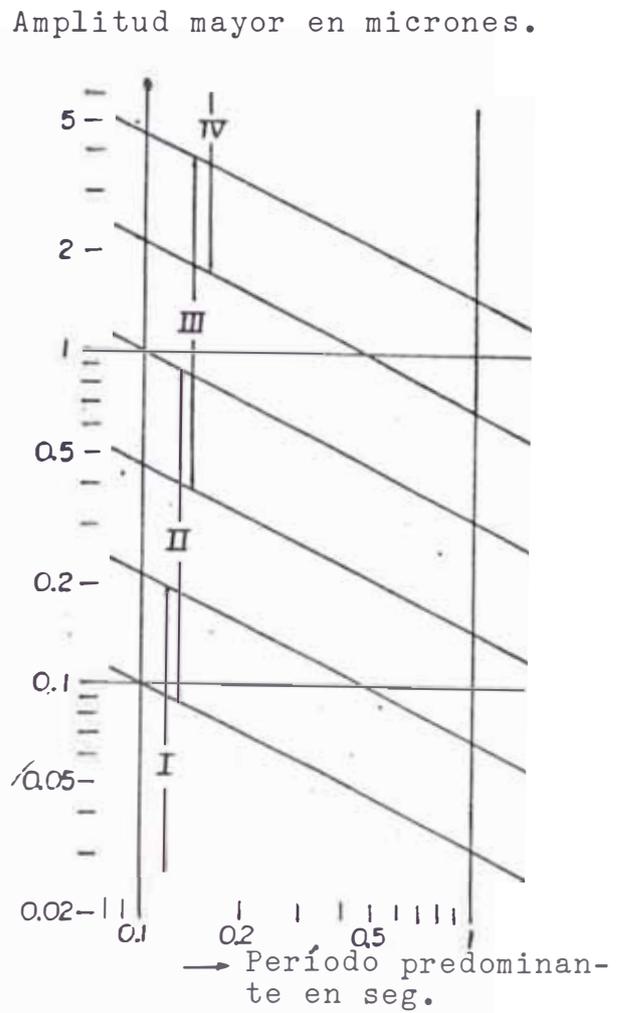


Fig.2.3. DIAGRAMA II

PROPUESTAS DE CLASIFICACION DE ACUERDO A KANAI.

- Los símbolos I, II, III y IV representan los tipos de suelo usados en el Código de Construcción del Japón.

- (KANAI y TANAKA. 1961).

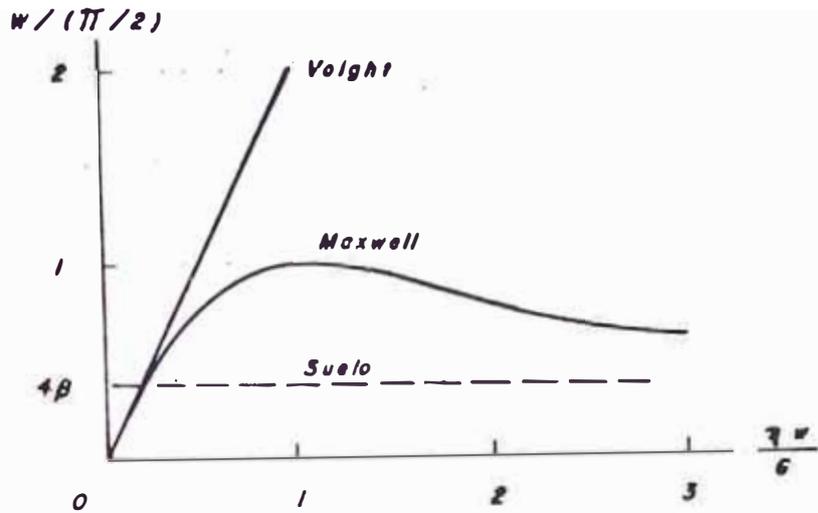


Fig.3.1. Modelos de factores de amortiguamiento y frecuencias.

(Ohsaki, 1975).

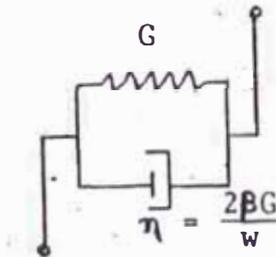


Fig.3.2. Modelo Histerético Lineal para representar el mecanismo de amortiguamiento en los suelos.

(Ohsaki, 1975).

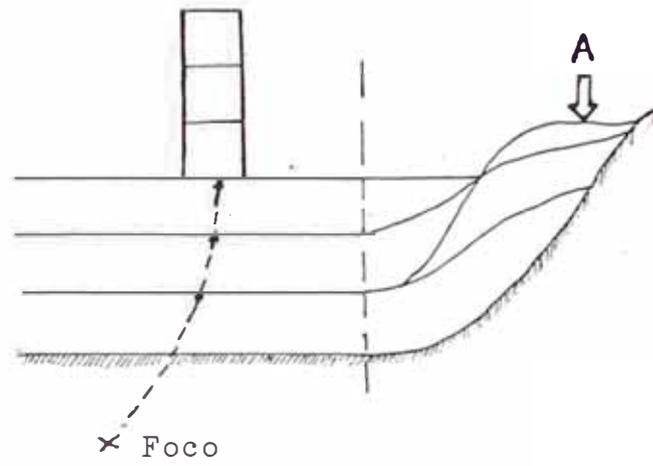


Fig.3.3. Propagación Vertical de ondas sísmicas.

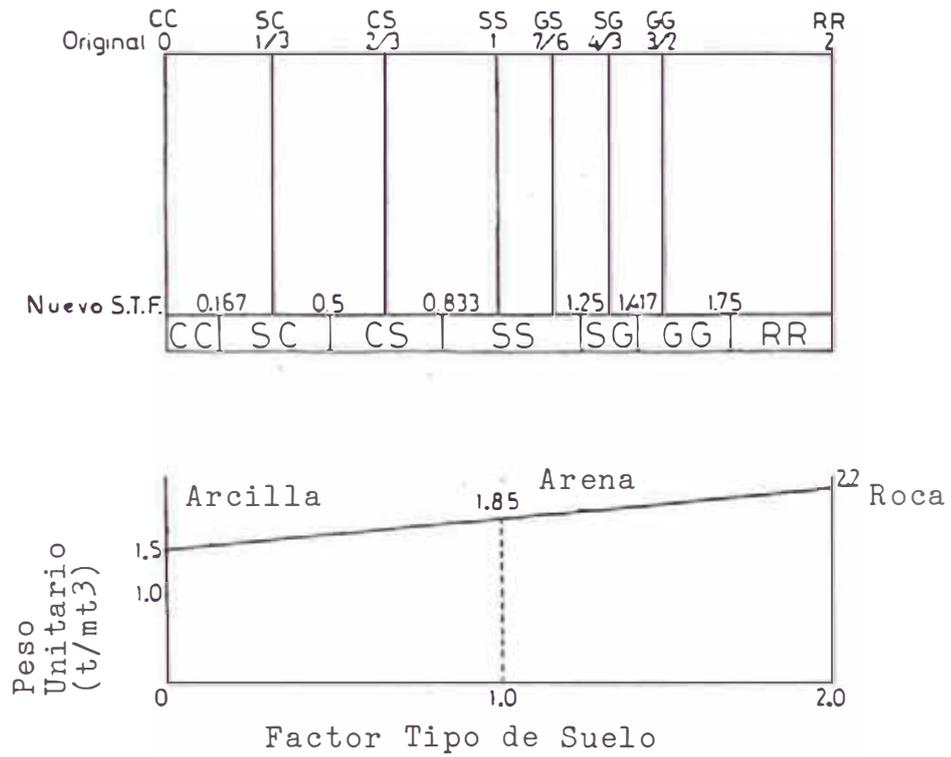


Fig. 3.4. Determinación del Peso Unitario de Suelos por medio del Factor Tipo de Suelo (S.T.F.)

(Hirosawa et.al., 1983).

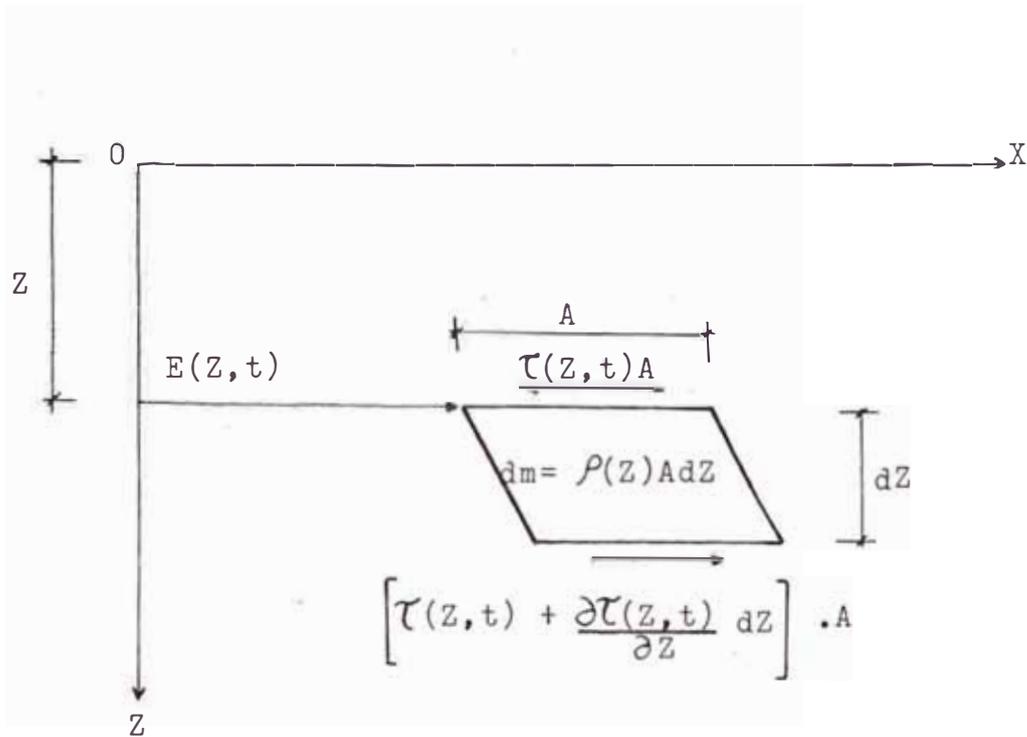


Fig. 3.5. Elemento infinitesimal de un depósito de suelo tomado para análisis dinámico como sistema continuo.

(Ohsaki, 1975).

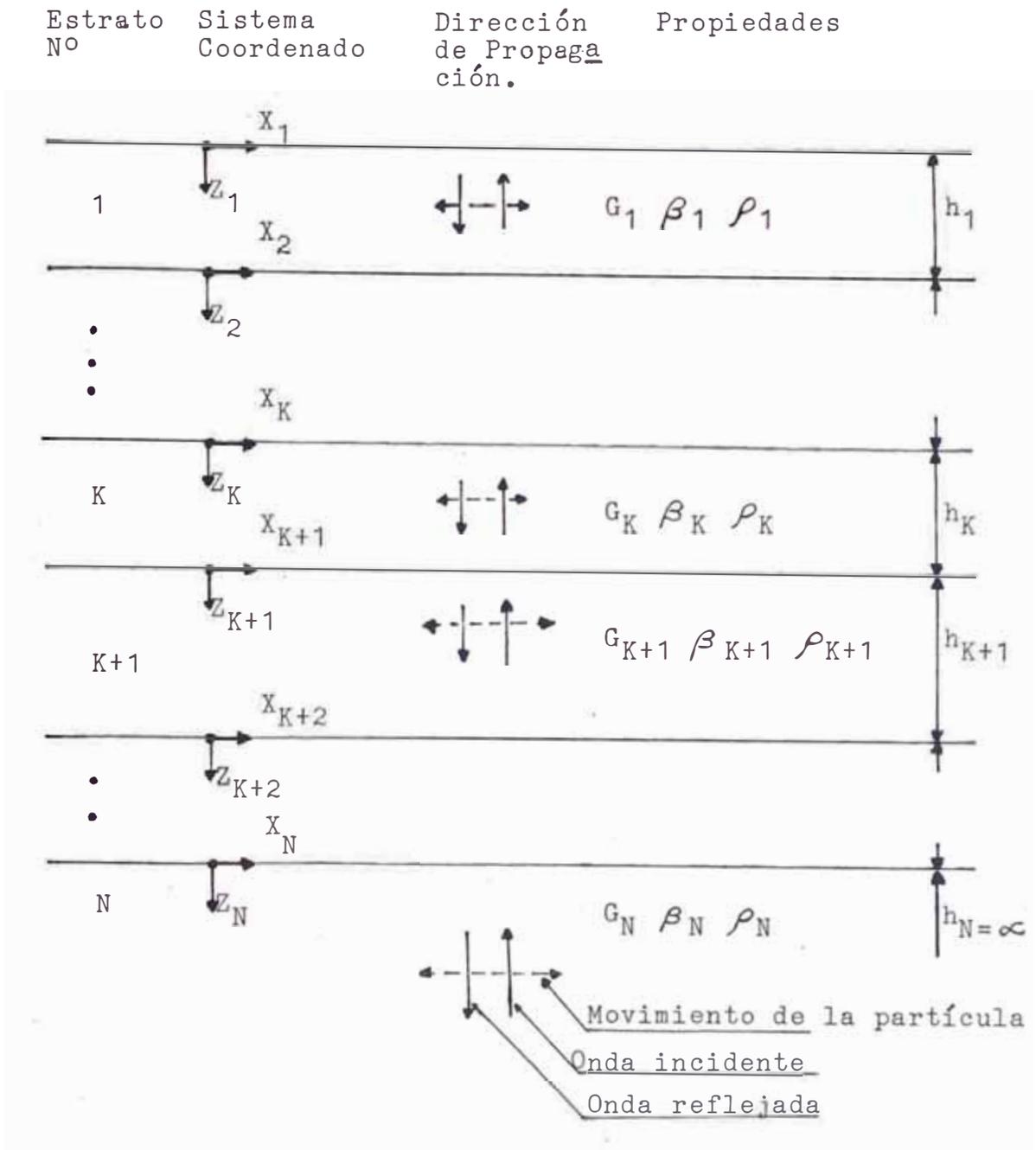


Fig. 3.6. Sistema Unidimensional  
(Schnabel et.al., 1972)

Profundidad 0.0 mts.  
/Profundidad 10.9 mts.

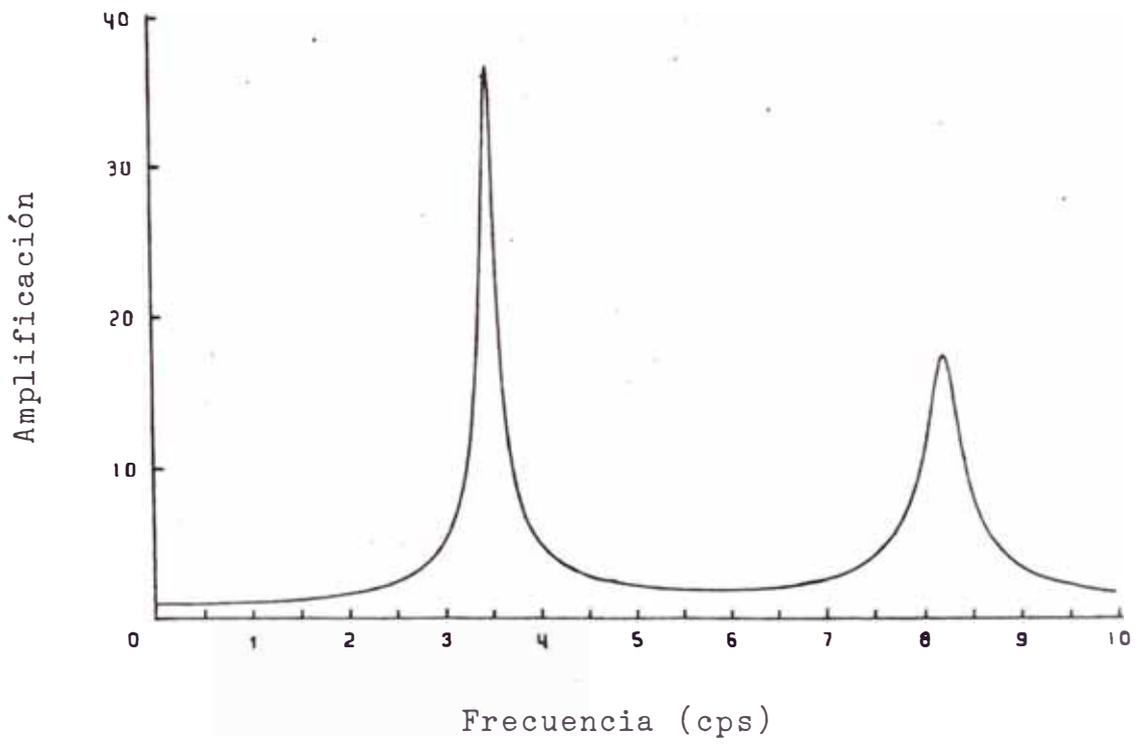


Fig.3.7. Espectro de Amplificación.

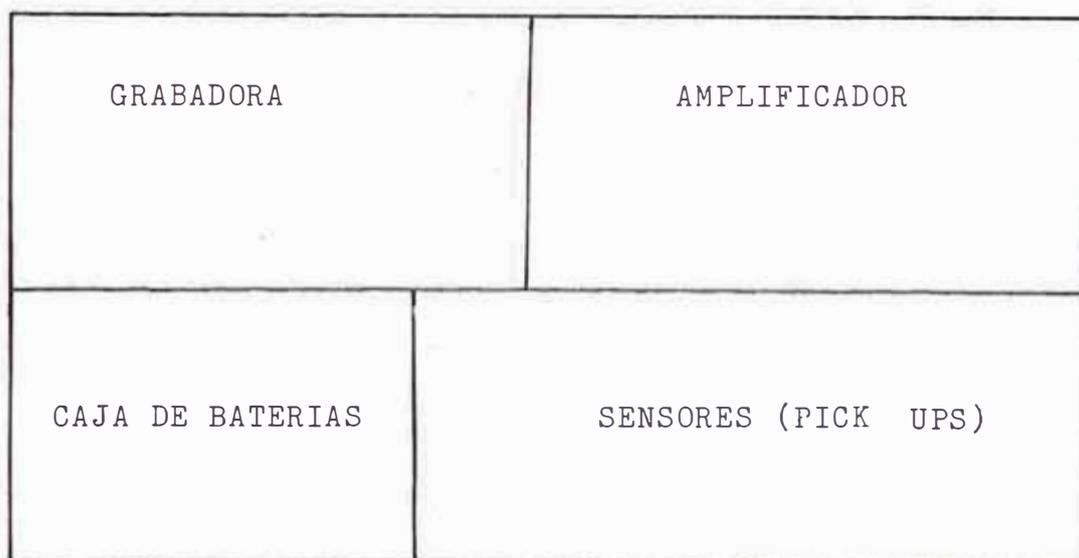


Fig. 4.2.1. Diagrama de la distribución de partes del "Microtremor Instrument"

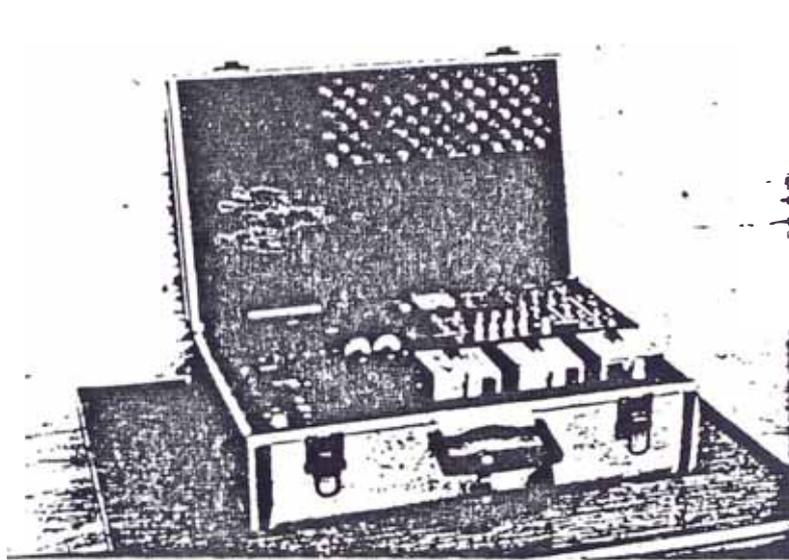


Fig.4.2.2 (a). Apariencia externa del "Microtremor Instrument", equipo portátil.

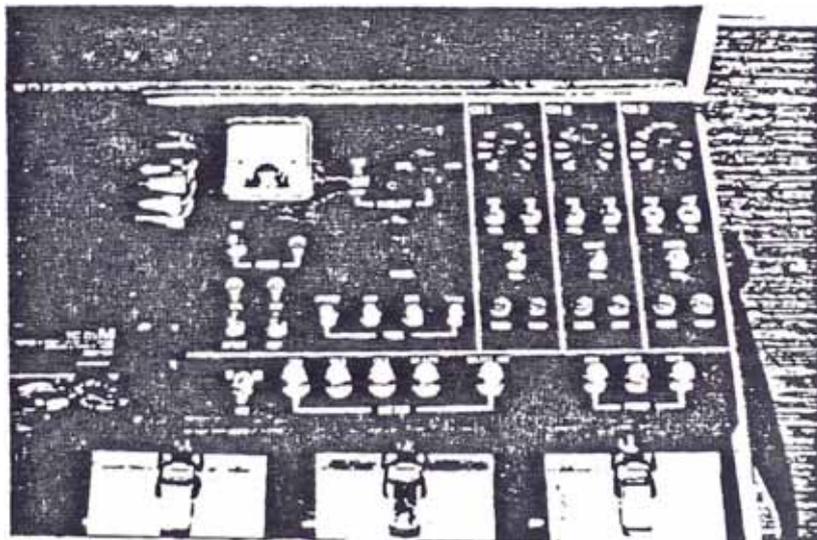
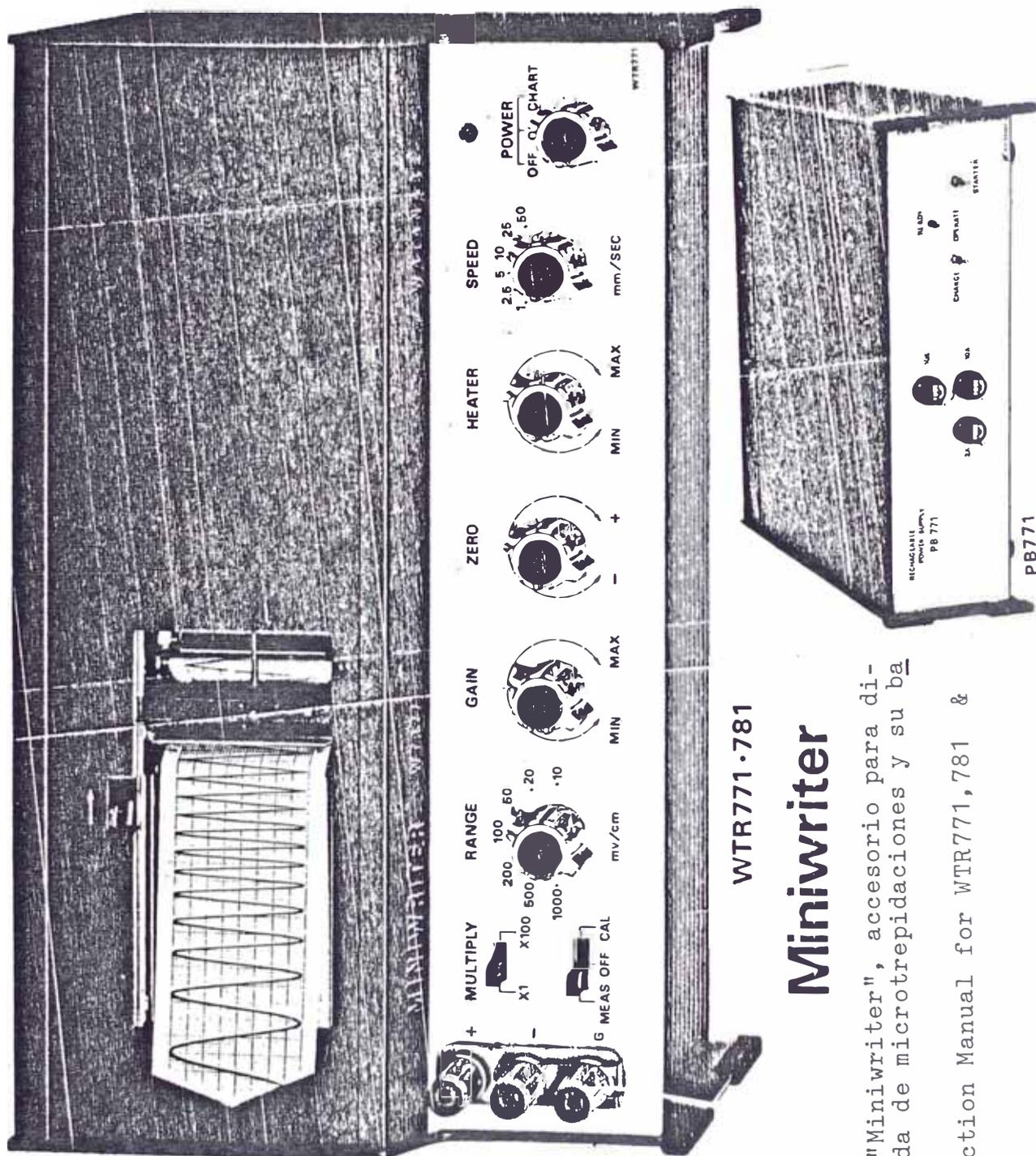


Fig. 4.2.2 (b). Amplificador del "Microtremor Instrumento".

(Del Manual del "Microtremor Instrument".)



WTR771-781

## Miniwriter

Fig.4.2.3 "Miniwriter", accesorio para dibujar la onda de microtrepidaciones y su batería.

(de "Instruction Manual for WTR771,781 & PB771").

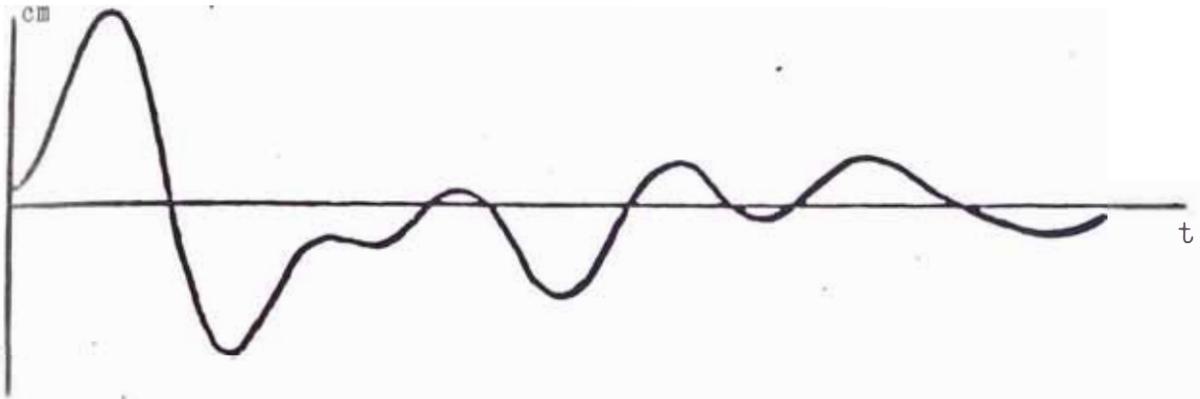


Fig. 4.3.1.(a) Onda suavizada continúa.

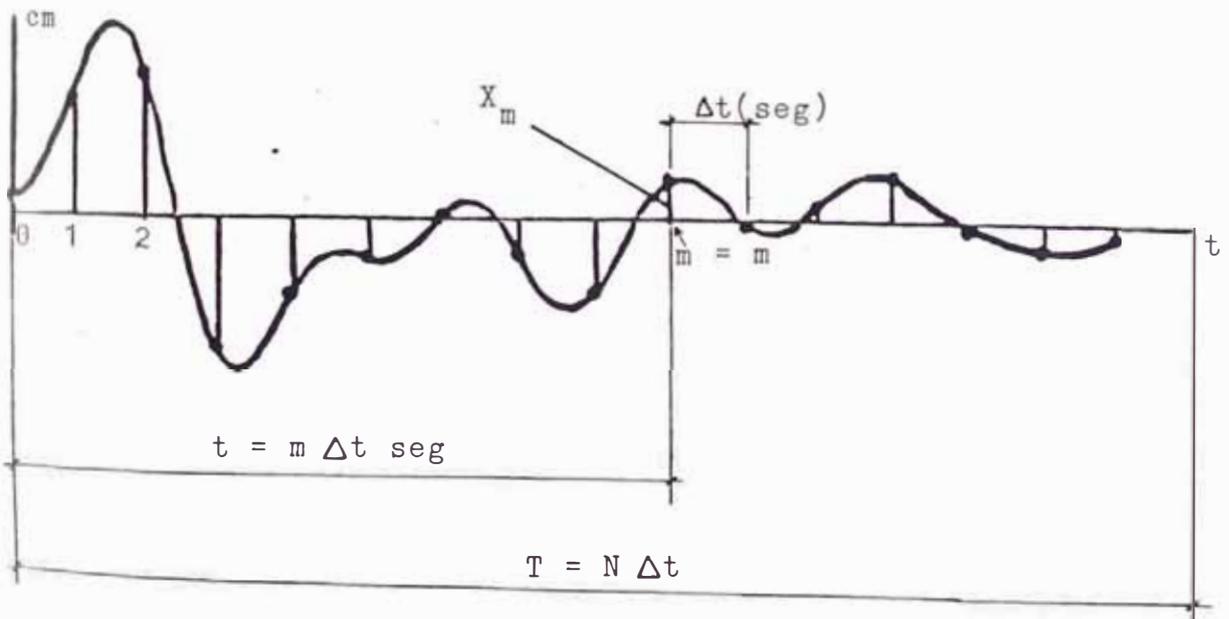


Fig. 4.3.1.(b) Proceso de digitación

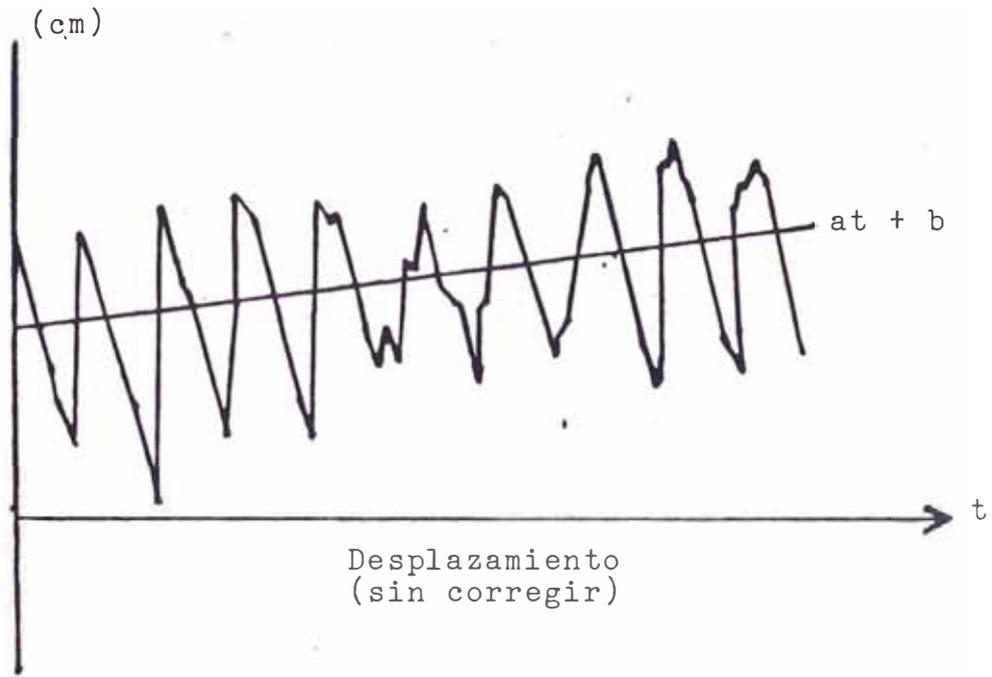


Fig. 4.3.2.-Corrección de la línea base-  
Representación esquemática.

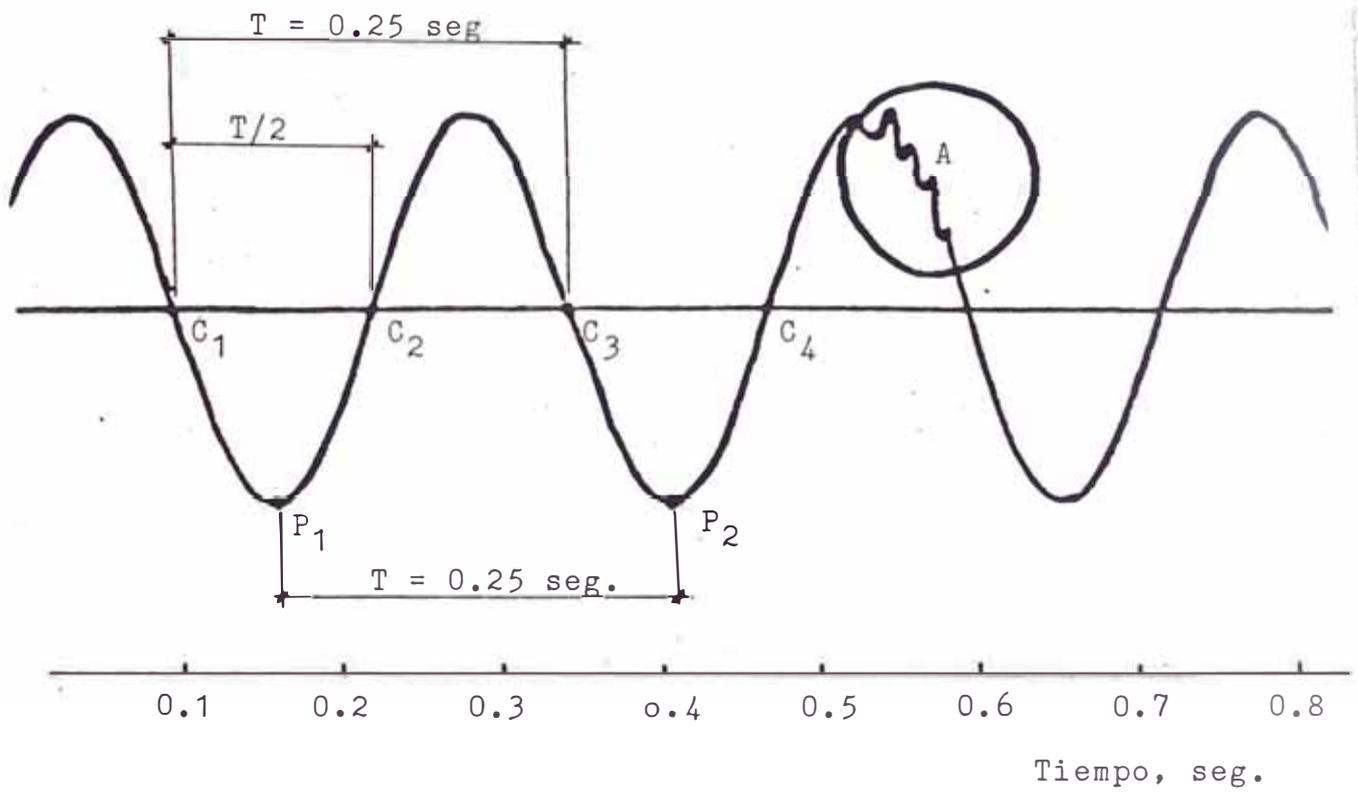


Fig. 4.3.3.- Curva sinusoidal  $f(t)$   
con período  $T = 0.25$  seg.

EL CENTRO, CALIFORNIA, 1940. 5.18 NS

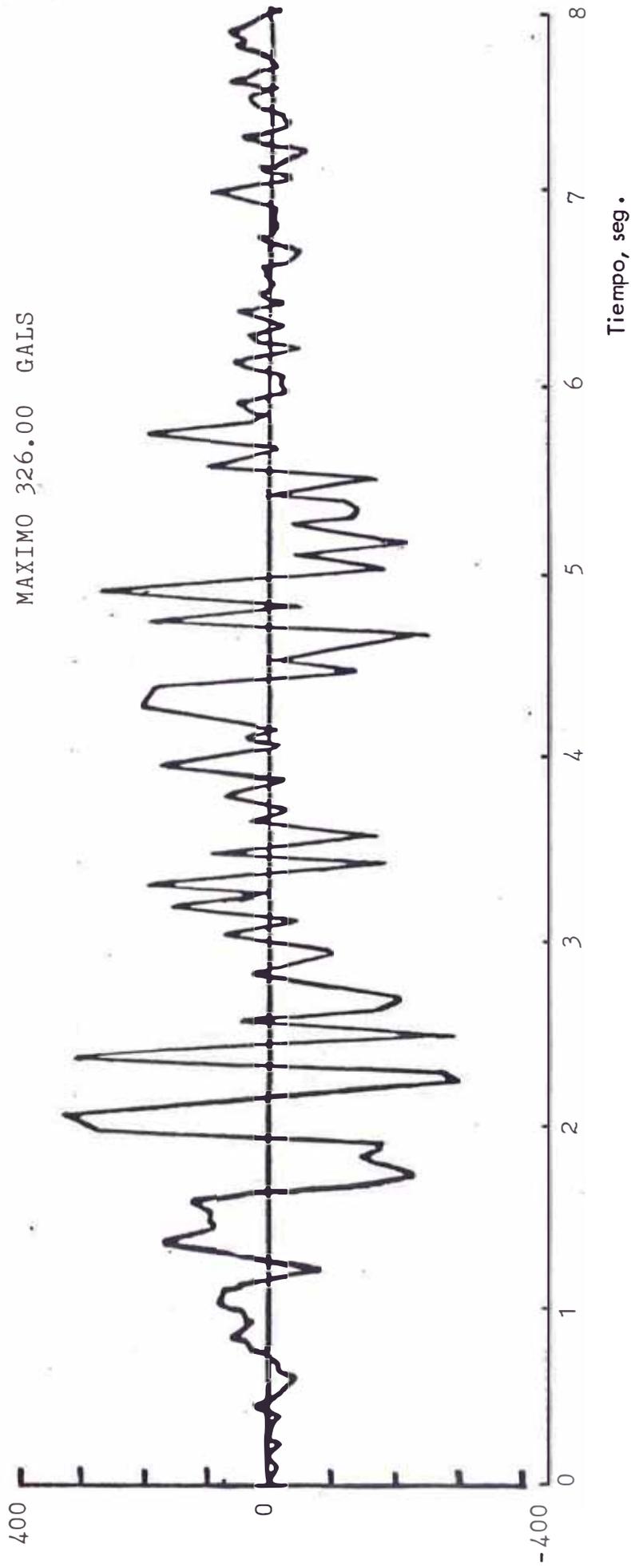


Fig. 4.3.4.- Onda Sísmica de "El Centro"

Fig. 4.3.5. HISTOGRAMA DE DISTRIBUCION FRECUENCIA-PERIDO

EL CENTRO - CALIFORNIA 1940.5.18 NS

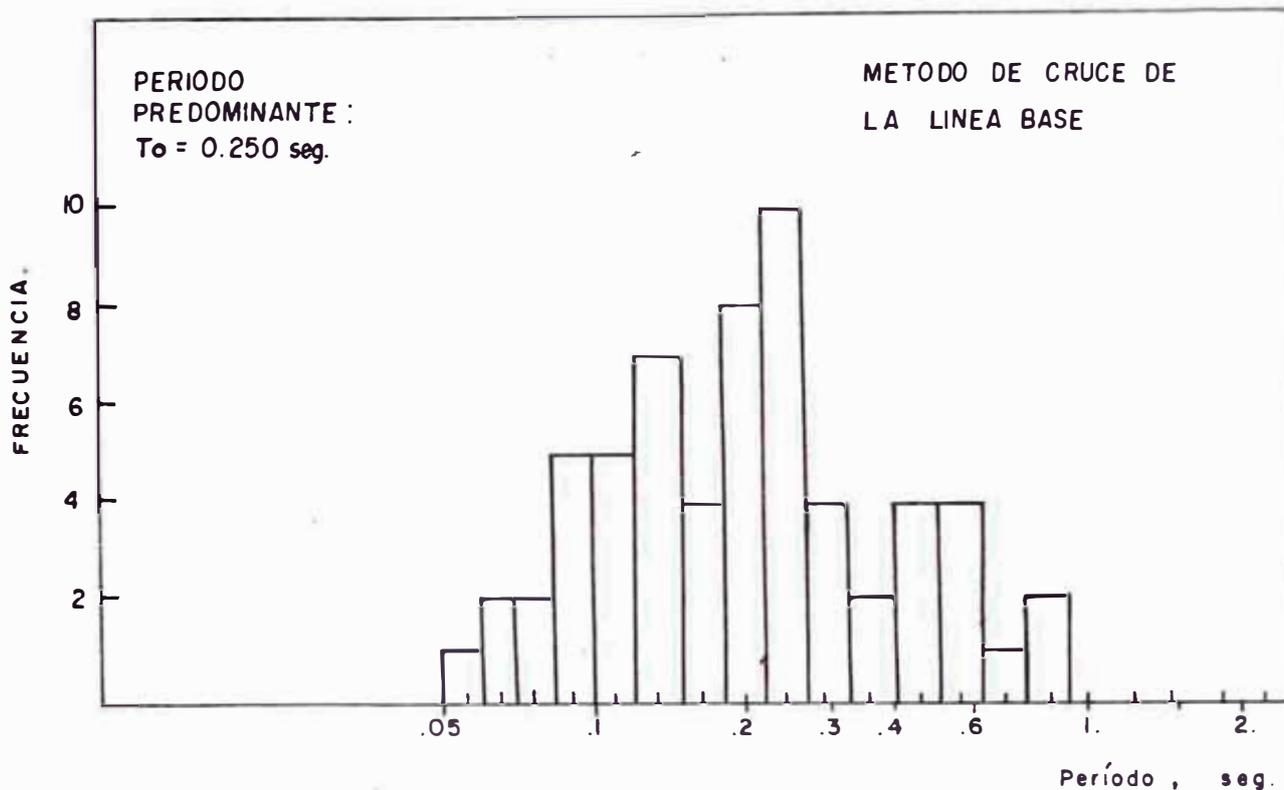
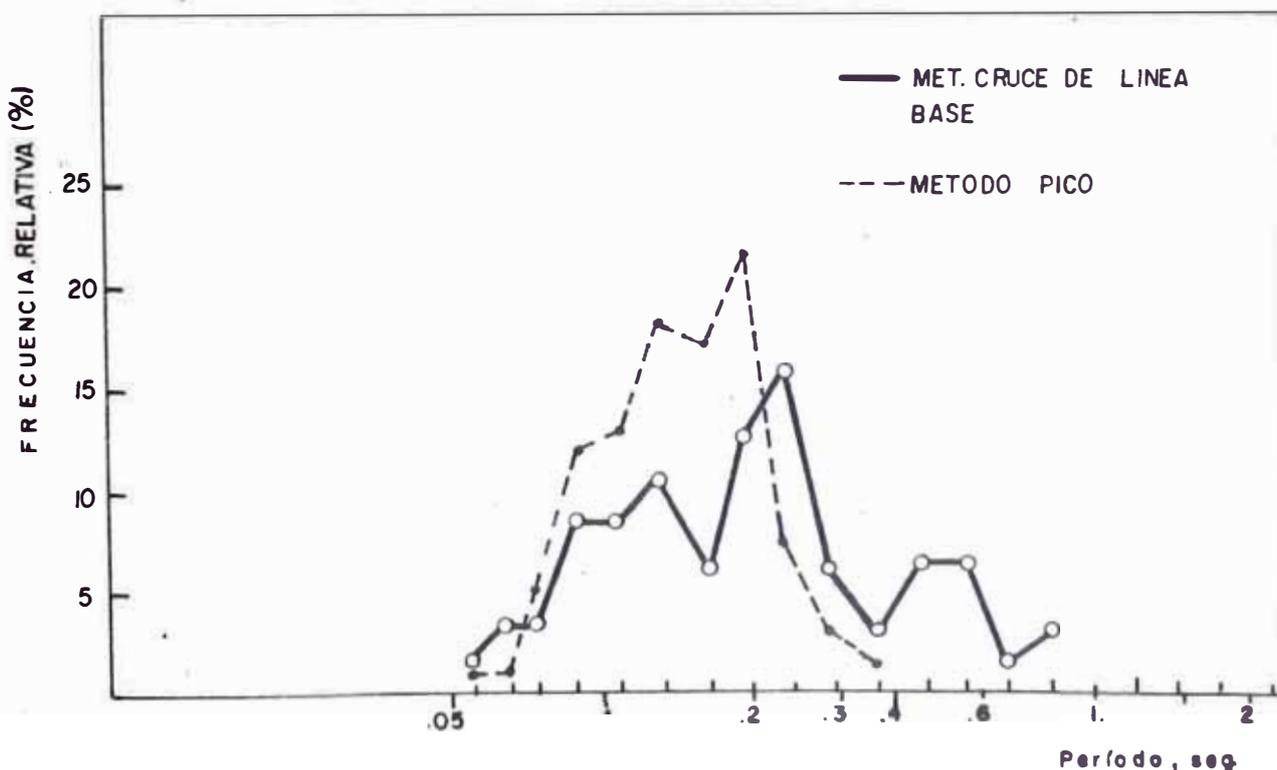


Fig. 4.3.6. ESPECTROS DE DISTRIBUCION FRECUENCIA - PERIODO

EL CENTRO - CALIFORNIA 1940.5.18 NS



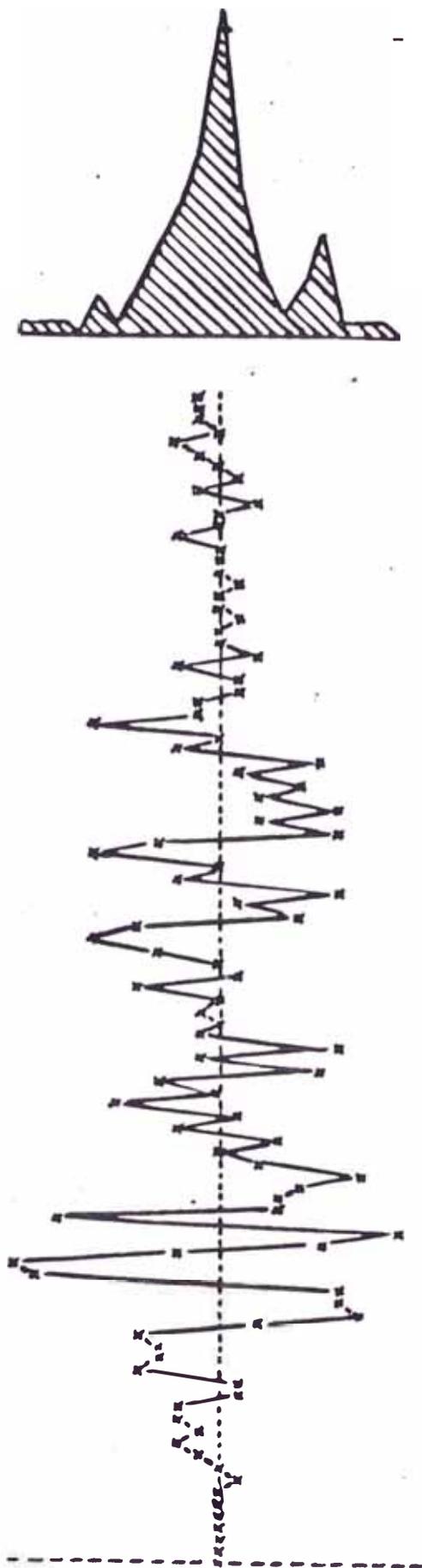


Fig. 4.3.7. - Onda de " El Centro " y su Espectro de Densidad de Probabilidades.

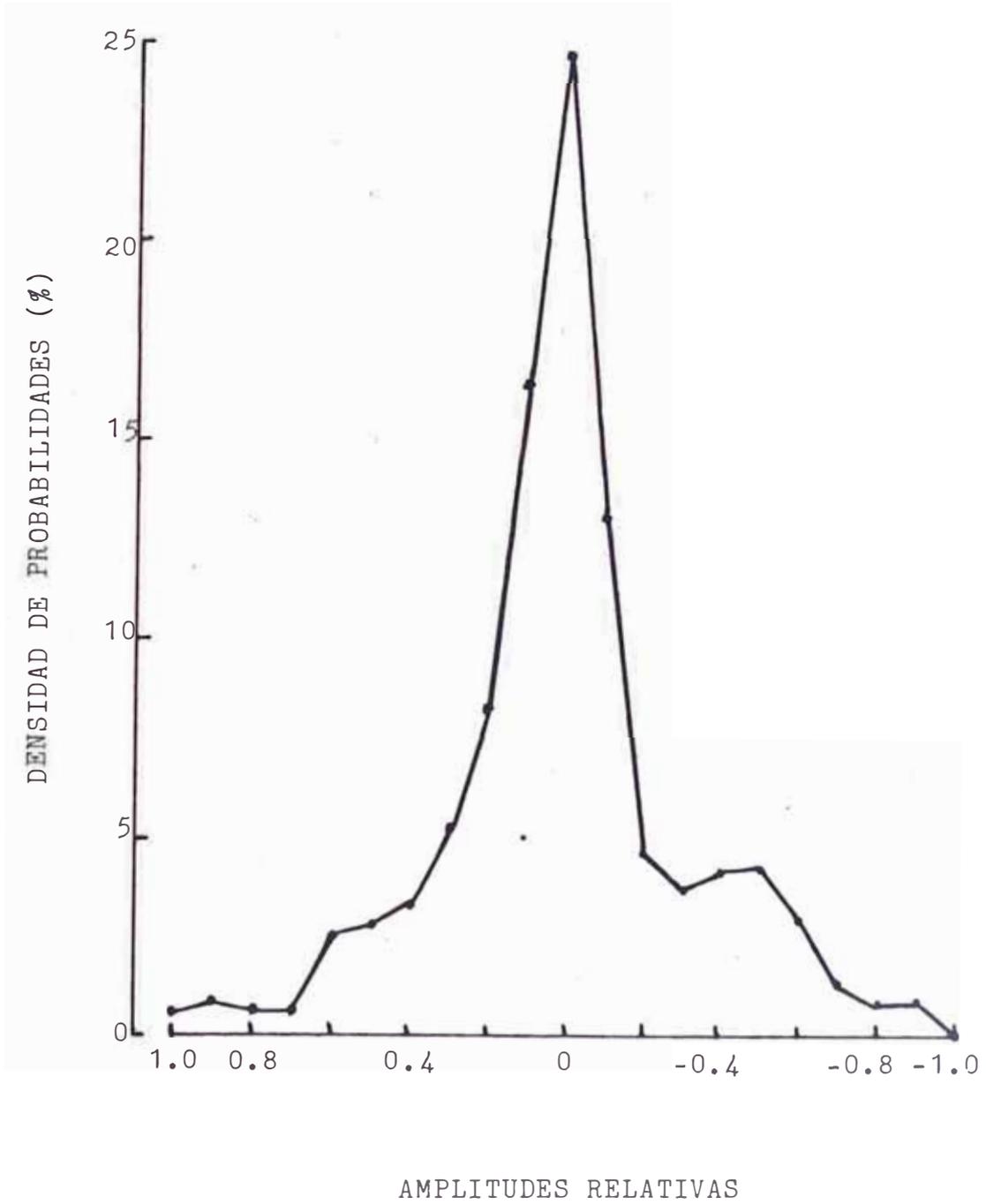
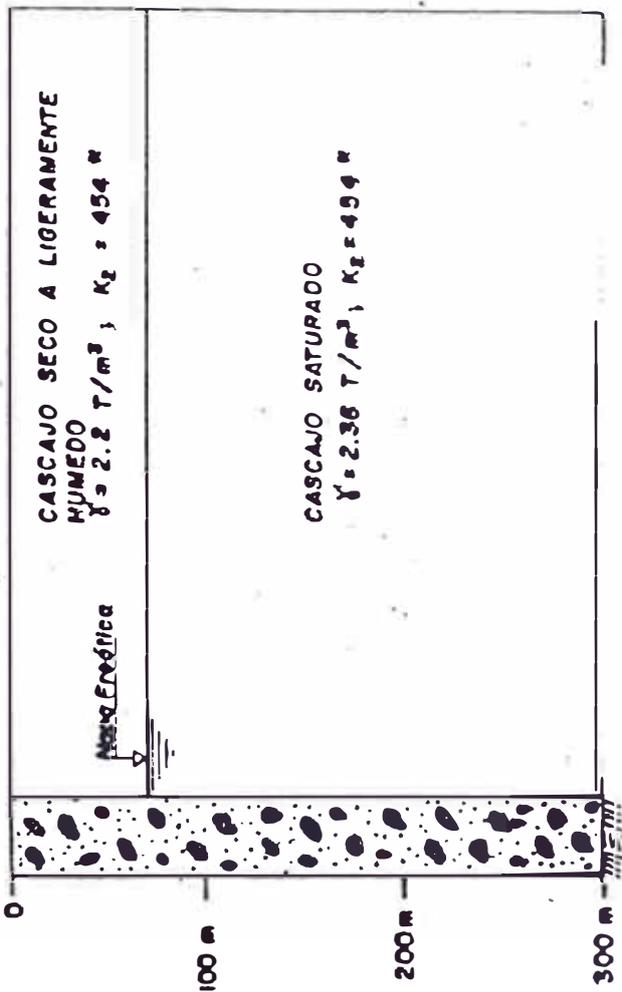
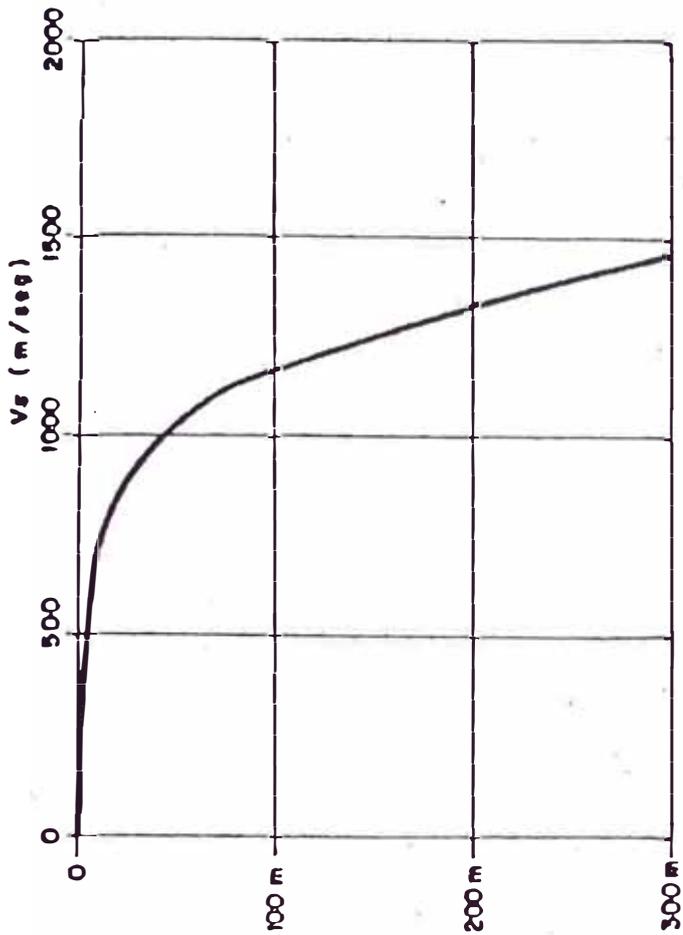


Fig.4.3.8.- Espectro de Densidad de Probabilidades de la onda de " El Centro "



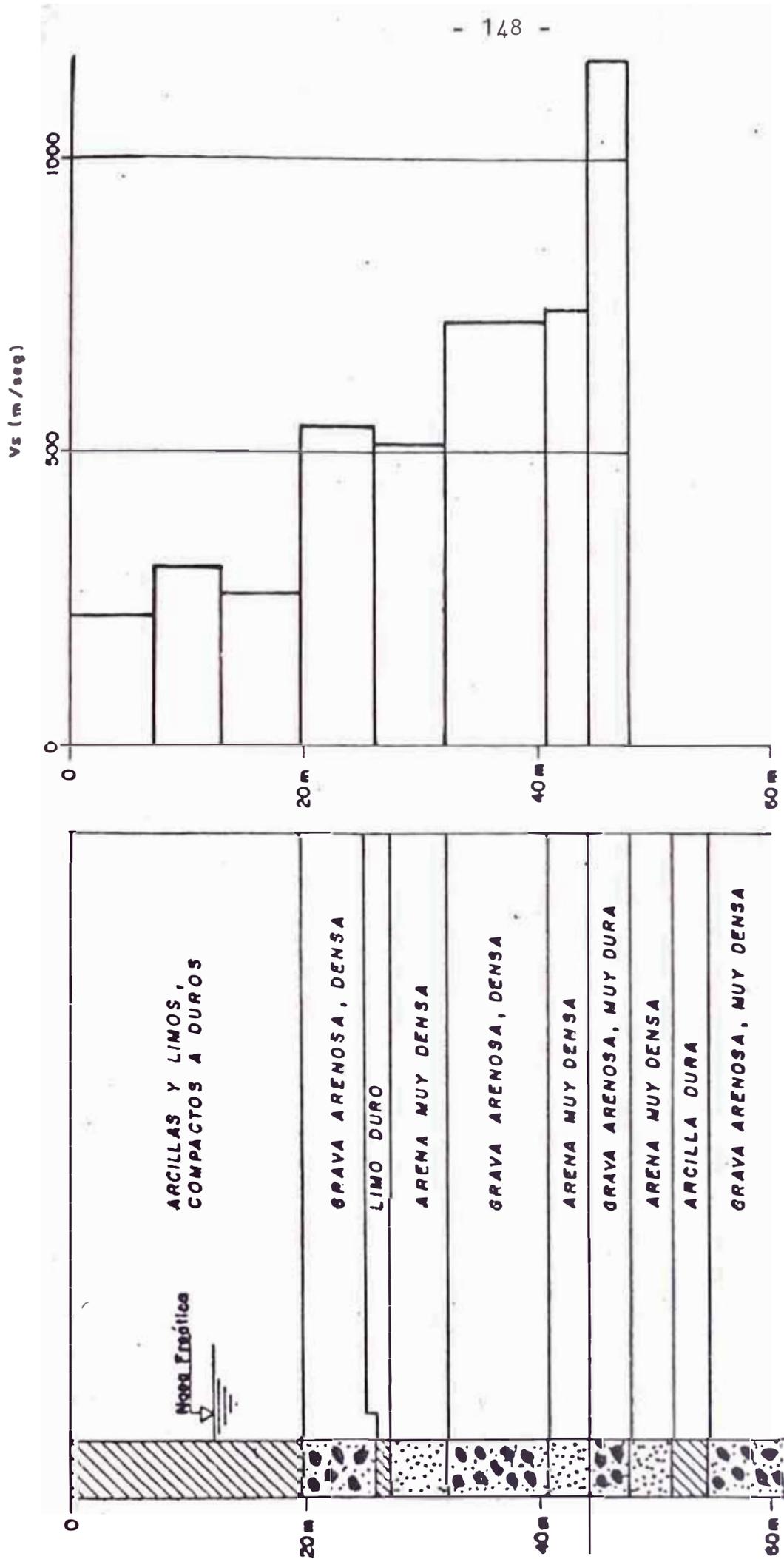
EL PERFIL DEL SUELO HA SIDO DETERMINADO HASTA 17m. POR MEDIO DE UNA CALICATA Y LUEGO EXTRAPOLADO EN BASE A INFORMACION GEOLOGICA, GEOFISICA Y DE POZOS DE AGUA.

$$T_0 = 0.09 \text{ seg}$$

\* VALOR PROMEDIO. CALCULADO POR LA ECUACION  $\sigma = 1000 K_s (\sigma_m)^{1/2}$ , A PARTIR DE MEDICIONES DE  $V_s$  EFECTUADAS POR EL METODO DOWN-HOLE, HASTA 17m DE PROFUNDIDAD EN EL PARQUE DE LA RESERVA Y 12m EN ZARATE.

Fig. 4.4.1.- PERIODO FUNDAMENTAL - PARQUE DE LA RESERVA

(Ottazzi et al., 1980)



$T_0 = 0.36 \text{ seg.}$

Fig. 4.4.2.- PERIODO FUNDAMENTAL - LA MOLINA

(Ottazzi, et.al, 1980)

## B I B L I O G R A F I A

- 1) Aki, K. (1957); "Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves with Special Reference to Microtremors"; Bulletin of the Earthquake Research Institute; Vol 35, P.P. 415-456; Tokyō, Japan.
- 2) Alva Hurtado, J.E. (1982); "Estudio Geotécnico de Cimentación para la Ampliación de la Clínica Chorrillos"; Instituto de Servicios de Salud S.A.; Chorrillos, Lima, Perú.
- 3) Alva Hurtado, J.E. (1982); "Estudio Geotécnico de Cimentación de la Sucursal Chimbote"; Caja de Ahorros de Lima, Sucursal Chimbote, Perú.
- 4) Alva Hurtado, J. y Orihuela Astupinaro, P. (1982); "Estudio de Licuación y Amplificación Sísmica en Chimbote Perú"; Anales - IV Congreso de Ingeniería Civil-Chiclayo.
- 5) Allan, A. (1969); "An Investigation into the Nature of Microtremors through Experimental Studies of Seismic Waves"; Doctoral Thesis of Tokyo University, Japan.
- 6) Allan, A. y Shima, E. (1967); "An Investigation into the Nature of Microtremor"; Bulletin of the Earthquake Research Institute; Vol. 45; P.P. 43-59; Tokyo, Japan.
- 7) Armas Aguirre, C. (1973); "Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Huaraz"; Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería; Lima, Perú.

- 8) Barrón, H. (1984). "Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de la Ciudad de Chimbote"; Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- 9) Carrillo Gil, A. (1974); "Estudio de Suelos para Cimentación . Ampliación Complejo Siderúrgico. Zona Este-Azul"; Chimbote-Perú.
- 10) CERESIS (1970); "Principios Fundamentales Para la Interpretación de Sismogramas"; Lima, Perú.
- 11) Chávez Martín, M.(1972); "Estudio Sísmico de Casma"; Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima-Perú.
- 12) Hirosawa M., Sugimura Y, Oh-Oka H. and Ohkawa I.(1983); "A Technique of Seismic Microzoning for Urban Areas"; Building Research Institute, Ministry of Construction; 15th Joint Meeting, U.S.- Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, Tsukuba, May 17-20, 1983.
- 13) Jacobs Pflucker O. (1974); "Investigaciones Geotécnicas para la Ampliación de la Planta Siderúrgica de Chimbote - Zona Verde"; Chimbote-Perú.
- 14) Kanai, K.(1962); "On the Predominant Period of Earthquake Motions"; Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 40 (1962), P.P. 855-860; Tokyo, Japan.
- 15) Kanai, K. (1966); "The Requisite Conditions for the Predominant Vibration of Ground"; Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 44 (1966); Tokyo, Japan.
- 16) Kanai, K., Hirano, K., Yoshizawa, S. and Asada, T.

- (1966); "Observation of Strong Earthquake Motions In Matsushiro Area. Part 1 (Empirical Formulae of Strong Earthquake Motions)"; Bulletin of the Earthquake Research Institute; Vol. 44 (1966) P.P. 1269-1296; Tokyo, Japan.
- 17) Kanai, K. and Tanaka, T. (1961); "On Microtremors.VIII"; Bulletin of the Earthquake Research Institute; Vol. 39 (1961). P.P. 97-114, Tokyo, Japan.
- 18) Kanai, K., Tanaka, T., Morishita, T. and Osada K. (1966); "Observations of Microtremors. XI (Matsushiro Earthquake Swarm Area)"; Bulletin of the Earthquake Research Institute; Vol. 44 (1966) P.P. 1297-1333; Tokyo, Japan.
- 19) Kanai, K., Tanaka, T. and Osada, K. (1954); "Measurement of the Micro-Tremors"; Bulletin of the Earthquake Research Institute. Vol. 32 (1954) Part 2; Tokyo, Japan.
- 20) Kuroiwa, J. (1982); "Simplified Microzonation Method for Urban Planning". Third International Earthquake Microzonation Conference. Seattle, U.S.A.
- 21) Kuroiwa, J. (1983); "Microzonificación Sísmica Aplicada al Planeamiento Urbano para la Prevención de Desastres"; TECNIA- Revista Técnico Científica; Universidad Nacional de Ingeniería; Vol. 2, N<sup>o</sup>2- Noviembre 1983; Lima, Perú.
- 22) Kuroiwa, J., Deza E. y Jaén H. (1973); " Investigation on the Peruvian Earthquake of May 31, 1970"; Proc. 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome.
- 23) LAGESA (1972); "Estudio de Suelos-Ciudad de Huaraz";

Estudio solicitado por el Ministerio de Vivienda; Huaraz, Perú.

- 24) LAGESA (1974); "Estudio de Suelos para el Mercado Mayorista"; Estudio solicitado por el Concejo Provincial del Santa; Chimbote, Perú.
- 25) Laura, A. (1977); "Estudio de la Amplificación de Ondas Sísmicas en los Suelos de la Ciudad de Huaraz" ; Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería; Lima, Perú.
- 26) Livesey and Henderson (1973); "Estudio del Sistema Portuario de Chimbote, Investigaciones de Suelos" ; CRYRZA, Dirección del Plan de Desarrollo de Chimbote, Lima, Perú.
- 27) Manuales de Uso: Manual del Medidor de Microtrepidaciones (Microtremor Instrument) y "Instruction Manual for WTR771, 781 & PB771" (Miniwriter).
- 28) Michelena R. y Asociados (1971); "Estudio de Suelos Definitivo Urb. Buenos Aires"; CRYRZA. Buenos Aires-Ministerio de Vivienda; Chimbote-Perú.
- 29) Michelena R. y Asociados (1974); "Investigaciones Geotécnicas para la Ampliación de la Planta Siderúrgica de Chimbote. Zona Marrón"; Chimbote- Perú.
- 30) Michelena R. y Asociados(1978); "Estudio de Suelos -

Molino Callao", Callao-Perú.

- 31) Morimoto, R., Koisumi Y., Matsuda T., Makuno M. and Yamaguchi I. (1971); "Seismic Microzoning of Chimbo-te Area, Perú"; March 1971; Overseas Technical Co-operation Agency, Government of Japan.
- 32) Noguchi, A. (1974); "Estudio de la Amplificación de Las Ondas Sísmicas en los Suelos de la Ciudad de Cas ma"; Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingenie<sup>u</sup>ría; Lima, Perú.
- 33) Ohsaki Y. (1972); "Correction of Earthquake Accelerograms", Research Report 72-01; Department of Architec<sup>u</sup>ture, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Ja-pan.
- 34) Ohsaki, Y. (1975); "Dynamic Characteristics and One-Dimensional Amplification Theory of Soil Deposits"; Lecture- Note for International Institute of Seismo-logy and Earthquake Engineering; Research Report 75-01; Department of Architecture, Faculty of Enginee -ring; University of Tokyo, Japan.
- 35) Ohsaki Y. (1976); "Introduction of Spectra Analysis of Earthquake Motion"; in Japanese, Tokyo.
- 36) Ohsaki, Y. and Iwasaki, R. (1973); "On Dynamic Shear Moduli and Poisson's Ratios of Soil Deposits"; Re search Report 73-02; Dept. of Architecture, Universi ty of Tokyo.

- 37) Ohsaki, Y. and Sakaguchi O. (1972); "Major Types of Soil Deposits in Japanese City Areas"; Research Report 72-03; Department of Architecture, University of Tokyo, Japan.
- 38) Ordoñez, E. (1984); "Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de Huaraz"; Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería; Lima, Perú.
- 39) Ottazzi G., Repetto P., Vargas J., Zegarra L.(1980); "Bases para una Revisión de las Normas Peruanas de Diseño Sismo-Resistente"; II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica; Organización de los Estados Americanos, Pontificia Universidad Católica del Perú; Lima, Perú.
- 40) Pérez Verástegui G. (1970); "Estudio Hidrogeológico de Chimbote"; Primer Congreso Latinoamericano de Geología, 22-29 de Noviembre de 1970; Tomo VI, pp.49-81; Lima, Perú.
- 41) Polo Sánchez, A. (1977); "Amplificación Sísmica para Lima Metropolitana por Efecto de las Propiedades del Suelo"; Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería; Lima, Perú.
- 42) Schnabel P., Lysmer J. and Seed H. (1972); "Shake. A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites"; Earthquake Engineering Research Center; Report N. EERC 72-12; College of Engineering, University of California, Berkeley-California.

- 43) Taniwangsa, W. (1981); "A Microzonation of Jakarta City"; Research Report 81-01, Department of Architecture, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Japan.
  
- 44) Taniwangsa de Chávez, W. (1983); "Análisis de Ondas Sísmicas"; Apuntes de Clase, Universidad Nacional de Ingeniería; Lima, Perú.
  
- 45) Villanueva Merino, J. (1975); "Estudio de Amplificación de Ondas Sísmicas en los Suelos de Chorrillos"; Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería; Lima, Perú.