

**Universidad Nacional de Ingeniería**

**Programa Académico de Ingeniería Civil**



**Coeficiente Sismico en el Perú y las  
Normas Peruanas**

**T E S I S**

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

**Presentada por:**

**Marco Antonio Torres Ramos**

**Promoción 1972**

**Lima - Perú**

**1974**

# I N D I C E

Pag.

## CAPITULO I

OBJETIVOS Y LIMITACIONES.....	1
-------------------------------	---

## CAPITULO II

### ELEMENTOS TEORICOS

2.1. Causas de los sismos y sismicidad en el Perú.....	5
2.2. El acelerografo.....	10
2.3. Fallas Superficiales y sus efectos.....	26
2.3.1. Ondas Sísmicas P y S.....	26
2.3.2. Ondas Superficiales.....	34
2.3.3. Repercusión elástica.....	36
2.4. Parámetros Focales.....	39
2.4.2. Epicentro.....	39
2.4.3. Magnitud e intensidad.....	43
2.4.3.1. Magnitud.....	43
2.4.3.2. Intensidad.....	49
2.4.3.3. Intensidad y aceleración.....	50
2.4.3.4. Intensidad-Energía.....	51
2.5. Diseño de Espectros.....	52
2.6. Ensayos Dinámicos .....	63
2.7. Respuestas Sísmicas de las Estructuras.....	66

CAPITULO III

COEFICIENTE SISMICO

3.1. Importancia.....	73
3.2. Factores.....	77
3.3. Influencia de cada uno de los factores Coeficiente Sísmico Básico(c).....	78

CAPITULO IV

4.1. Coeficiente Sísmico Básico de Lima.....	87
4.2. Análisis del Sismo del 17 de Octubre de 1966.....	87

CAPITULO V

COMPARACION DE COEFICIENTES SISMICOS DE VARIOS  
PAISES.

Rumanía.....	89
Francia.....	95
Estados Unidos .....	99
Japón.....	107
Unión Soviética.....	115
Perú.....	120

CAPITULO VI

CONCLUSIONES.....	128
BIBLIOGRAFIA.....	I

## C A P I T U L O        I

---

### OBJETIVOS Y LIMITACIONES

El Perú se encuentra sísmicamente en el Cinturón Circumpacífico, lo cual explica que sufra los efectos de severos sismos que producen daños económicos y humanos.

Es responsabilidad de la Ingeniería Antisísmica, profundizar cada vez más en el conocimiento de las causas de los sismos y del comportamiento de las estructuras, con el propósito de obtener especificaciones de diseño sísmo-resistente que minimicen los efectos destructores.

Los códigos de construcción de diferentes países, requieren para las especificaciones del --- cálculo de las fuerzas sísmicas, que actúan sobre las estructuras, el empleo de un coeficiente sísmico  $C$ . La fuerza de diseño sísmico de una estructura es igual al producto del coeficiente sísmico por el pe-

so de las cargas permanentes más una parte de las cargas vivas de la estructura, sujeta a la acción sísmica.

El principal objetivo de los requerimientos en la determinación de las fuerzas sísmicas que actúan sobre una estructura, es que esta última no sufra el azar de los movimientos sísmicos. Algunos efectos en las estructuras pueden ser subsanados, pero la estructura no sufrir destrucción.

Los actuales criterios en la determinación del coeficiente sísmico están basados en las siguientes consideraciones: la probabilidad de ocurrencia de los sismos, las características del terreno, la naturaleza de las deformaciones estructurales, el comportamiento de los materiales de los edificios cuando están sujetos al tránsito de los esfuerzos oscilatorios, la naturaleza de las destrucciones en los edificios que puedan ser reparadas, el costo de reparación de la rajaduras comparado con el costo de proveer resistencia adicional a los edificios para que no sufran ninguna clase de rajadura.

El coeficiente sísmico puede ser expresado como el producto del coeficiente sísmico básico por los valores numéricos de los diferentes factores que condicionan a este último factor, tales como la aceleración máxima de la roca base, el amortiguamiento, la interacción suelo-estructura, etc.

La finalidad de este trabajo, es intentar ser una contribución científica al diseño sísmico de las estructuras en el país.

Emplearemos el método dinámico para el cálculo de las fuerzas sísmicas, al considerar las características elásticas de las estructuras.

Lo que se hallará será la curva del coeficiente sísmico básico para Lima utilizando el acelerograma del sismo del 17 de Octubre de 1966, el cual nos proporcionara los Espectros de Respuesta para diferentes amortiguamientos.

El trabajo se ha dividido en seis capítulos. En el Capítulo II dan los elementos teóricos suficientes para comprender lo esencial de la Ingeniería

Antisísmica. El coeficiente sísmico es analizado en el Capítulo III. El Coeficiente Sísmico Básico para Lima es presentado, junto con sus datos y resultados en el Capítulo IV. El Capítulo V se ha dedicado a la comparación de los Coeficientes Sísmicos de varios países. Finalizando con las conclusiones en el Capítulo VI.

C A P I T U L O    I I

---

2.1. CAUSAS DE LOS SISMOS Y SISMICIDAD EN  
EL PERU.

Se entiende por sismo, prescindiendo de la naturaleza de su origen, una sacudida de la tierra. En la forma más frecuente, es la ruptura repentina del equilibrio elástico de una región del interior de la Tierra y las vibraciones elásticas que ella produce y que se propagan en todas las direcciones. Una vibración de la superficie terrestre, durante un sismo, es producida por el paso de ondas de choque a través de ella, que han sido producidas por el cambio brusco en el estado de las fuerzas en equilibrio. Cuando ocurre un desplazamiento relativo a lo largo de una falla activa, este ocasiona ondas de choque que se propagan en todas las direcciones y cuando las manifestaciones superficiales de estas cruzan un punto determinado de la superficie terrestre, ésta es obligada a vibrar.

De acuerdo a su origen los sismos se dividen en volcánicos, tectónicos y de colapso. Los sismos volcánicos son en general de poca intensidad y están directamente relacionados con la actividad de los volcanes.

Los sismos tectónicos están relacionados con los procesos de deformación de la corteza terrestre que dan origen a la formación de continentes y montañas. A este tipo pertenecen todos los sismos grandes. La mayoría de los sismos tectónicos superficiales están asociados con fallas de la corteza terrestre. Los desplazamientos relativos de los lados de una falla producidos por un sismo pueden a veces ser observados directamente. En el terremoto de 1906 en San Francisco, California, la falla de San Andrés se desplazó **visiblemente** en una extensión de 300 kms. Para los terremotos profundos, donde el material está sometido a altas presiones y temperaturas no es probable que el mecanismo del foco puede explicarse en términos de una simple falla, (Udías, 1971). Cambios súbitos de volumen ligados a cambios de fase en la composición de los materiales e inestabilidades de -

flujo han sido presentados como posibles explicaciones de los focos profundos.

Otras causas de los sismos de menor importancia son el colapso de las cavernas, la caída de meteoritos y corrimientos de tierra. Estos últimos son a veces producidos por sismos tectónicos y por lo tanto son fenómenos secundarios y no causa de los sismos. Un ejemplo reciente de corrimiento de tierra producido por un sismo es el de Yungay, Perú, 1970.

El estudio de los diferentes sismos ocurridos indica que estos pueden originarse hasta profundidades de 700 kms., bajo la superficie terrestre, pero los movimientos del suelo de intensidad suficiente como para ser de significación en la ingeniería sismológica se producen en profundidades menores de 200 kms de la superficie, siendo especialmente destructivas las originadas a 15 a 20 kms. de profundidad.

La relativa frecuencia de ocurrencia de los sismos en algunas regiones, ha llevado a determinar tres regiones sísmicas principales en el mundo que-

son: la región del Himalaya en la India Septentrional, la zona mediterránea del Cercano Oriente y el Cinturón Circumpacífico.

El Perú se encuentra dentro del Cinturón Circumpacífico. Los estudios efectuados por Huaco (1963) indican los diferentes zonas de fractura que existen, basándose en la distribución y alineamiento de los sismos destructores y de los sismos débiles acompañados con algunas relaciones estructurales.

#### CARACTERISTICAS DE LA ACTIVIDAD SISMICA EN EL PERU.-

La principal zona activa corre de sur a norte, en forma paralela a la línea de la costa, a una distancia de 70kms. Las evidencias sísmicas que se destacan son el sensible alineamiento de los epicentros de sismos destructores de diferentes magnitudes y profundidades que varían entre los 60 y 300 kms.; la acumulación de hipocentros de sismos pequeños en la zona denominada "Sistema de Fallamiento San Agus-

tín", la alta actividad sísmica que se registra en la zona de Ica; la existencia de la Cadena Submarina de Nazca; en el norte, los epicentros son predominantemente superficiales.

La zona de Ancash- Satipo recorre mas o menos 600 kms., en dirección No.  $40^{\circ}$  W, pasa por los núcleos sísmicos de Ancash y Satipo.

Mencionaremos una relación de los sismos - más fuertes ocurridos en el Perú, en los últimos años:

1958	13 Enero	Arequipa
1960	15 Enero	Arequipa
1966	6 Agosto	Ica
1966	17 Octubre	Lima
1967	Setiembre	Lima
1968	18 Mayo	Moyobamba
1970	31 Mayo	Huaraz

Huaco (1963) clasifica en cuatro las regiones sísmicas del Perú:

- 1.- Regiones de sismos extremadamente fuertes con intensidades, en la Escala Modificada de Mercalli, de 9.
- 2.- Regiones en que los sismos podrían causar serias destrucciones. Con intensidades de 9 y 8.
- 3.- Regiones de sismos que podrían causar daños parciales. Con intensidad de 7 y 6.
- 4.- Regiones de sismos no destructores. Con intensidades menores de 6.

## 2.2. EL ACELEROGRAFO

El acelerógrafo es un instrumento de registro sísmico, que se pone en funcionamiento en forma automática al producirse un sismo de cierta intensidad; sus componentes principales son tres acelerómetros (dos horizontales y uno vertical), que registra-

rán las tres componentes de la aceleración producida durante el sismo (Sanhueza, 1969).

En general los aparatos para registro sísmico son estructuras de un grado de libertad, con resorte y amortiguador como lo indica la fig. 1.

Para este sistema la ecuación del movimiento será:

$$m \ddot{u}_t + c \dot{u} + ku = 0 \quad (1)$$

Si a esta estructura se le da un desplazamiento  $U_b$  en la base, la ecuación general del movimiento será:

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + ku = -m\ddot{u}_b \quad (2)$$

Donde:

$u_b$  : desplazamiento de la base

$m$  : masa del péndulo

$c$  : amortiguamiento

$k$  : constante del resorte.

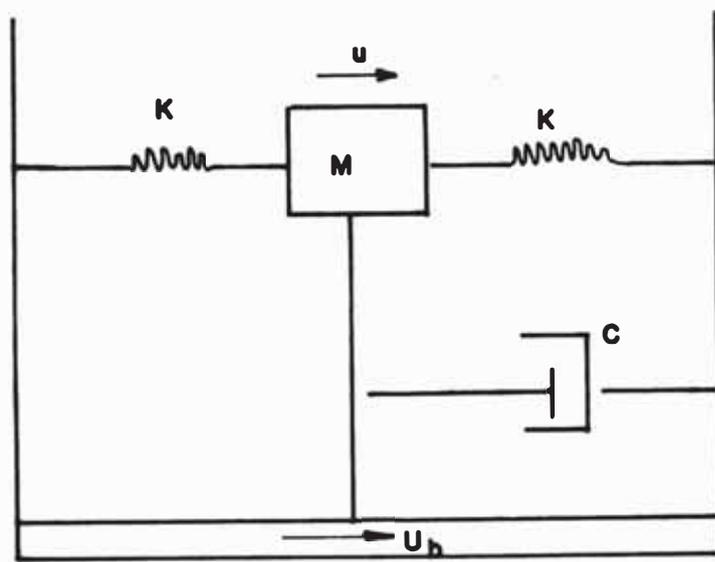


FIG. 1

Suponiendo que la amplificación del instrumento es  $V$ . Entonces la señal registrada por el acelerógrafo será:  $x = Vu$

$$\text{Llamando } w = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \lambda = \frac{c}{2mw} = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

e introduciendo estos valores en la ecuación (2) se tiene:

$$\ddot{u} + 2\lambda w \dot{u} + w^2 u = -\ddot{u}_b$$

Si en esta Ecuación se reemplaza el valor de  $x = Vu$  se tiene:

$$\ddot{x} + 2\lambda w \dot{x} + w^2 x = -V \ddot{u}_b \quad (3)$$

Suponiendo que el movimiento de la base está dado - por

$$u_b = Y \cos p t, \text{ entonces}$$

$$\ddot{u}_b = -p^2 Y \cos p t$$

introduciendo este valor en la ecuación (3) se tiene:

$$\ddot{x} + 2 \lambda w \dot{x} + w^2 x = VY p^2 \cos pt \quad (4)$$

Considerando que  $e^{ipt} = \cos pt + i \sin pt$ , e introduciéndolo en la ecuación(4), se tiene:

$$\ddot{x} + 2 \lambda w \dot{x} + w^2 x = VY p^2 \operatorname{Re}(e^{ipt}) \quad (5)$$

Si se supone una solución para la Ecuación (5) del tipo

$$x = X e^{ipt}, \text{ entonces}$$

$$\dot{x} = i p X e^{ipt}$$

$$\ddot{x} = - p^2 X e^{ipt}$$

e introduciendo estos valores en la Ecuación(5) se tiene :

$$X e^{ipt}(- p^2 + 2i \lambda w p + w^2) = VY p^2 e^{ipt}$$

lo que da:

$$x = \frac{VY p^2}{w^2 - p^2 + 2i \lambda w p} e^{ipt}$$

o también

$$x = \frac{VY}{w^2} \frac{p^2}{(1 - p^2/w^2) + 2i \lambda p/w} e^{ipt}$$

llamando  $\beta = p/w$

en que  $w$  : frecuencia del instrumento =  $\frac{2\pi}{T_{instr}}$

$p$  = frecuencia de las ondas sísmicas en el  
suelo =  $\frac{2\pi}{T_{suelo}}$

$\beta$  = constante

$$x = \frac{VY}{w^2} \frac{p^2}{(1-\beta^2) + 2i\lambda\beta} e^{ipt}$$

reduciendo el complejo queda

$$x = \frac{VY p^2}{w^2} \frac{1}{((1-\beta^2)^2 + 4\lambda^2\beta^2)^{1/2}} e^{i(pt-\theta)}$$

donde:

$$\theta = \arctg \frac{2\lambda\beta}{(1-\beta^2)}$$

Cuando  $\beta$  tiende a cero, el valor de  $w$  se hace muy -  
grande por lo que  $w^2 \gg p^2$  y  $\frac{4\pi^2}{T^2_{instr}} \gg \frac{4\pi^2}{T^2_{suelo}}$

por lo tanto  $T_{suelo} \gg T_{instr}$ , es decir, que cuan-

do el período del **suelo** es mucho mayor que el del instrumento el valor de  $\beta$  tiende a cero, con lo que  $\theta = \text{arc tg } \frac{2\lambda\beta}{1-\beta^2}$  tiende a cero, con lo cual el valor de  $e^{i(pt-\theta)} = \cos(pt-\theta) + i \sin(pt-\theta)$  se convierte en  $e^{ipt} = \cos pt + i \sin pt$ ; tomando solo  $\text{Re}(e^{ipt})$  se tiene

$$x = \frac{VY p^2 \cos pt}{w^2}$$

pero  $Y p^2 \cos pt = -\ddot{u}_b$ , lo que da

$$x = \frac{V}{\omega^2} \ddot{u}_b \quad (6)$$

De donde se deduce que el registro  $x$  que el instrumento deja sobre el papel, es proporcional a la aceleración del suelo; por lo tanto el instrumento trabaja como registrador de las aceleraciones del suelo. Considerando de que un acelerógrafo debe tener un péndulo cuyo período sea mucho menor que el período de vibración del suelo.

### ACELEROGRAFOS

Los acelerógrafos son instrumentos que miden las aceleraciones absolutas de terreno, proporcionando los datos necesarios para la construcción de espectros de respuesta durante movimientos sísmicos.

El diseño de los acelerógrafos está representado en la fig. 2. La línea en el diagrama derecho superior representa el terreno, cuyo movimiento deseamos determinar. Se une al terreno una masa  $m$ , por medio de un resorte lineal y un elemento de amortiguamiento viscoso  $c$ . Esto constituye el instrumento, cuyo rendimiento es el desplazamiento relativo entre la masa y el terreno, el cual es medido sin un punto de referencia axial. Esto nos puede demostrar de las ecuaciones de movimiento del sistema masa-resorte que a un período particular de movimiento del terreno, el registro del instrumento es proporcional a la aceleración del terreno. Sin embargo, el factor de proporcionalidad depende del período del movimien-

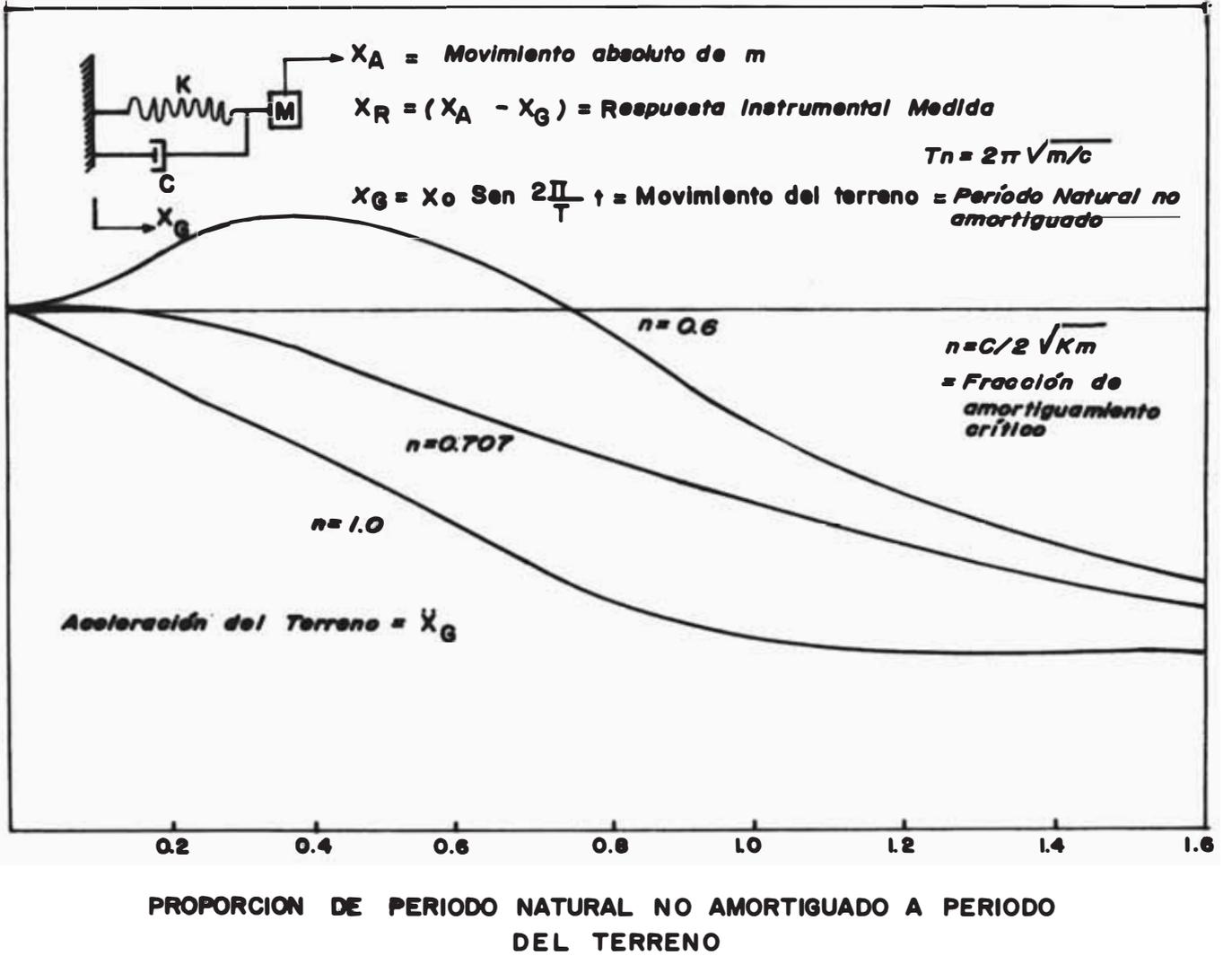


FIG. 2 PRINCIPIOS DE DISEÑO DEL ACELEROGRAFO  
 (SEGUN HUDSON 1,970)

to, y el objeto del diseño del instrumento es hacer la respuesta lo mas independiente posible del período. El típico espectro de Fourier indica que la forma de la onda de aceleración del terreno incluye muchas componentes del período. Reproducir la forma de la onda con el debido cuidado es algo que para lograrlo, el instrumento debe registrar cada componente con el mismo factor de proporcionalidad.

La curva de respuesta del instrumento de la fig. 2.10, muestra muy bien, cómo nuestro propósito puede ser logrado en la práctica. Si la curva donde una línea recta horizontal, la respuesta del instrumento sería independiente del período. Esto sería -- visto que para una juiciosa selección del amortiguamiento, debe ser alrededor del 0.6 á 0.7 del amortiguamiento crítico, y es posible alcanzar unas características instrumentales que son aproximadamente constante sobre una banda de períodos desde cero a un período cercanamente igual al período natural del sistema instrumental masa-resorte. Esto último está indicando que el diseño de un acelerógrafo traduce

traduce satisfactoriamente dos condiciones : (1) El período natural del instrumento será más pequeño -- que el período más pequeño a ser medido y (2) el amortiguamiento sería de 0.6 á 0.7 del amortiguamiento crítico. Bajo estas condiciones el instrumento proporcionará un registro fiel a la componente del período mas pequeño, y todos los valores de los períodos más largos serían medidos con mayor cuidado.

Otra dificultad presente a tener en cuenta en el diseño del acelerógrafo es la que presenta la fase alternada entre el movimiento del terreno y el desplazamiento relativo medido por el traductor. Si la fase alterna es la misma para ondas de todos los períodos, entonces la señal resultante sería simplemente alternada un poco en el tiempo, lo cual no sería consecuencia para cálculos de respuesta estructural. Si la fase alternada es diferente para períodos diferente, sin embargo, las ondas componentes añadirían en la señal proporcionada, otra que es formada diferentemente de la señal registra. Esto podría mostrar que si la fase alternada puede ser hecha como una función lineal de la frecuencia, cuando la on-

da de rendimiento resultante haría la misma forma-- como la onda registrada, con un pequeño alternado - constante de fase. Este alternado constante de fase simplemente mueve un poco a la escala del tiempo, lo cual no es importante para los objetivos presentes. Afortunadamente, este hecho desarrollaría que un elemento, haciendo un amortiguamiento de alrededor - del 70% del amortiguamiento crítico posea una curva de frecuencia de fase alternada, que es una buena aproximación a una línea recta, así que el mismo valor de amortiguamiento que da una curva de respuesta de amplitud óptima es también el mejor valor del punto de la fase alternada. Esto se podría concluir que un valor de amortiguamiento comprendido entre el 60% al 70% del amortiguamiento crítico, sería un valor - óptimo, que produciría una amplitud y respuesta de - pase satisfactorias para períodos que son menores que el período más pequeño a ser medido.

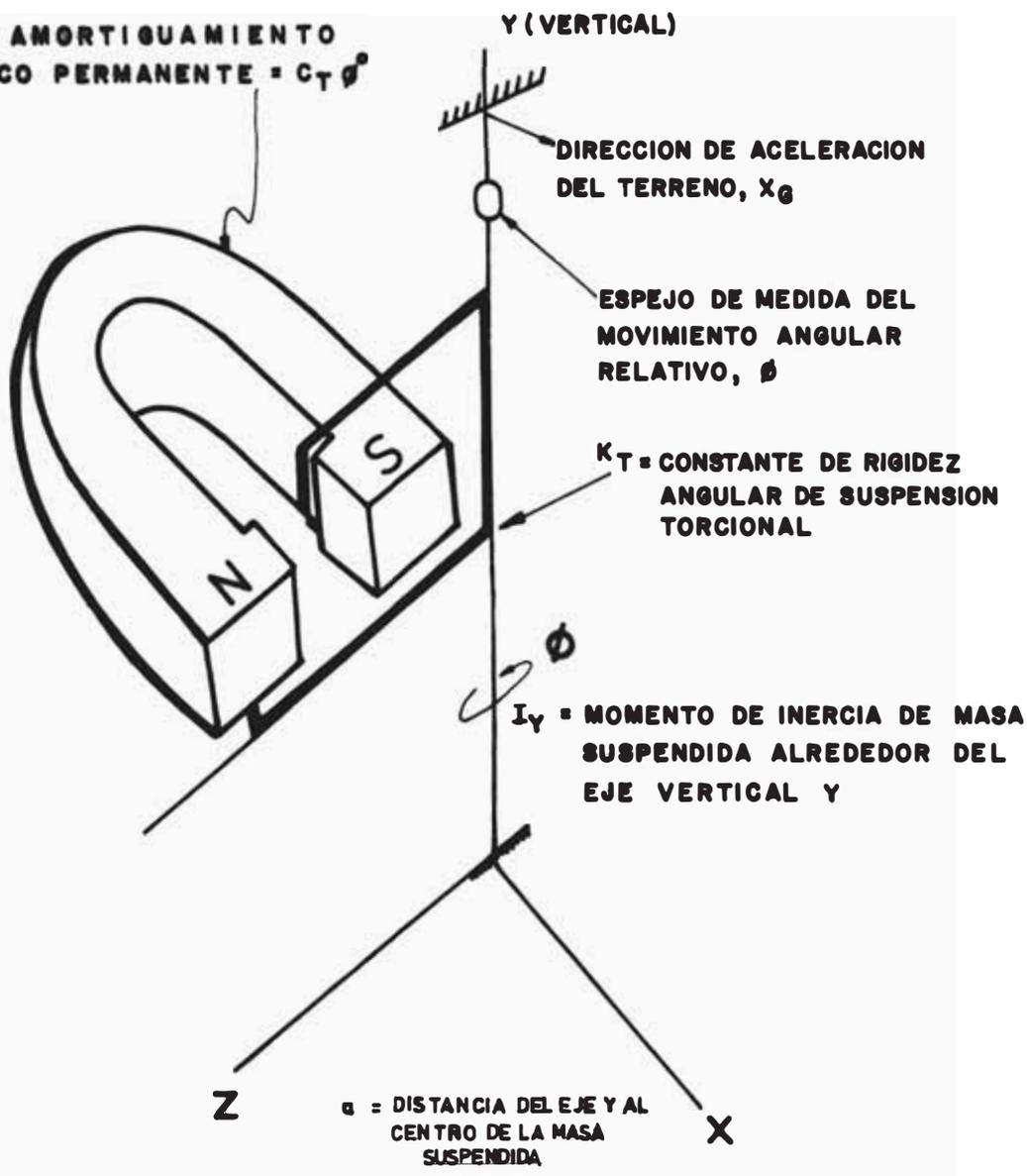
Considerando que los períodos más cortos de interés en los movimientos sísmicos del terreno son alrededor de 0.1 seg., es evidente que el período de acelerógrafo sería un poco menor que 0.1 seg. El ace-

lerógrafo USCGS estandard, considera este criterio y emplea un rango de 0.05 á 0.08 sgs. La desventaja de reducir el período del instrumento estriba en el hecho de que la sensibilidad del instrumento es reducida.

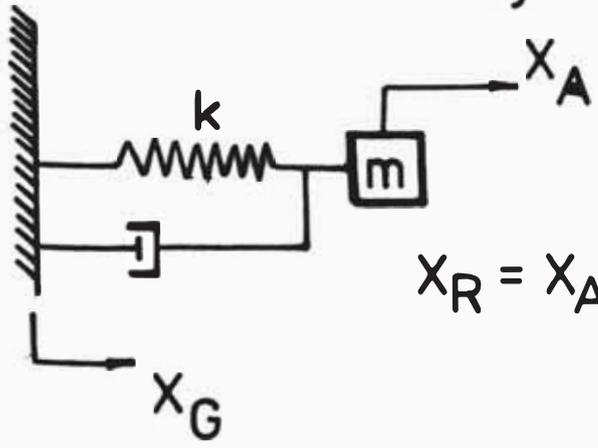
#### DETALLES DE DISEÑO DE ACELEROGRAFOS

Una forma en la que el sistema resorte-masa-amortiguamiento del acelerógrafo teórico de la fig. 2 C.4, aparece en la práctica, puede ser observado en el diseño diagramatizado del elemento del traductor horizontal del acelerógrafo USCGS, mostrado en la fig 3. En este instrumento, la masa en movimiento es un circuito de alambre que se mece en forma semejante al movimiento de una puerta alrededor de un eje vertical de suspensión. Como el circuito de alambre rota, esto mueve en el campo magnético formado por un magneto permanente, y los remolinos corrientes inducidos en el circuito colocan fuerzas de amortiguamiento viscoso. La ventaja de un torsión un poco más que el arreglo rectilineal, es que los desplazamientos an-

TORQUE DE AMORTIGUAMIENTO  
MAGNETICO PERMANENTE =  $C_T \dot{\phi}$



$$I_y \ddot{\phi} + C_t \dot{\phi} + K_t \phi = -ma \ddot{X}_G$$



$$m \ddot{X}_R + C \dot{X}_R + k X_R = -m \ddot{X}_G$$

$$X_R = X_A - X_G$$

Fig. 3.- Diagrama Esquemático del Acelerógrafo USC GS

gulares pueden ser fácilmente amplificados y registrados óptimamente montando un espejo en la suspensión de torsión.

Una variante de este mismo elemento es empleada en los acelerógrafos AR240 y RFT250. En estos instrumentos, el simple circuito de alambre formando la masa sísmica es reemplazada por una espiral de alambre. Por cambio de la resistencia externa del circuito espiral, el amortiguamiento puede ser colocado en un valor deseado. Una ventaja adicional del sistema de espiral es que una señal eléctrica extrema puede ser introducida fácilmente en el elemento traductor para propósitos de alibración. Una forma diferente de encontrar los mismos resultados finales, el acelerógrafo japonés SMAC, posee el elemento traductor cuya masa sísmica es soportada sobre el fin de una barra rígida que rota alrededor de una bisagra. Por los movimientos muy pequeños el sistema registra movimientos rectilíneos. La masa sísmica por si misma forma el pistón del sistema de amortiguamiento de aire, el que es provisto con suficientes espacios pequeños y en esta forma se logra el amortiguamiento crítico. El amor-

tiguador de aire tiene la ventaja de una relativa - independencia de amortiguamiento con temperatura. El movimiento rectilíneo de la masa es magnificado 16 veces por un sistema nivelador mecánico, y el registro final es escreto en un papel encerado por medio de una aguja de zafiro. Aunque la amplitud registrada es pequeña, La línea graficada es muy fina por lo que puede ser efectuada magnificación del registro si se desea. En orden a reducir los requerimientos de energía de la batería, el papel registrador es - impulsado por motor de resorte mecánico.

Los resultados generales obtenidos en los instrumentos de arriba, son logrados por diferentes medios en el acelerógrafo 02 diseñado en Nueva Ze-- landia . El elemento traductor en este mecanismo es una pequeña masa montada sobre cuatro resortes formados en pares, los cuales contraen la masa a rotar alrededor de un eje simple. El amortiguamiento es provisto por el agregado a la masa de una pala que mueve un aceite silicone. Son agregados también espejos a la masa y se emplea una película de 35 mm.

REQUERIMIENTOS DE SENSITIVIDAD

La primera consideración incluida en la sensibilidad instrumental necesaria es que las aceleraciones de los sismos más grandes posibles puedan colocarse en un escala. Esto requiere también que la escala deba ser tal que los datos período-aceleración puedan ser leídos del registro con un conveniente cuidado para cálculos de respuestas sísmicas.

Estudios detallados han indicado que la aceleración máxima causada por movimientos sísmicos en los terrenos aluvionales no es mayor que 0.5 g. y que la duración del movimiento sísmico no es mayor que 45 segs. Son consideraciones teóricas las que incluyen el mecanismo probable de generación y propagación de ondas sísmicas, también sugieren que los valores límites de 0.5 g. son correctos. La práctica corriente ha tendido a tomar como límite máximo a 1.0 g. La sensibilidad actual de los instrumentos depende de los detalles de la técnica de registro. Algunos instrumentos son diseñados para que escriban un registro corto sobre un papel impresor angos-

to con una línea fina, así que el registro pueda ser magnificado por lecturas cuidadosas.

### VELOCIDAD DE REGISTRO Y SISTEMA DE ARRANQUE

La velocidad de registro debe ser tal que - la forma de ondas complicadas pueda ser medida con - un cuidado adecuado para análisis espectral y para - cálculos de respuestas sísmicas. Una velocidad de 1 cm/seg. ha sido estandarizada por algunos acelerógrafos. Ahora se acepta que una velocidad más alta sería más deseable y una velocidad de 2 cm/seg. simplificaría los procesos de análisis de datos.

A esas velocidades de registro, un registro fiel en 24 horas es completamente impracticable, y - entonces se presenta la necesidad de algún tipo de - arranque ~~de~~ inercia activado por el sismo. Este mecanismo de arranque es acaso el componente más crítico de todo el acelerógrafo y es la parte más dificultosa de especificar y diseñar. Puesto que los primeros registros del acelerógrafo pueda contener significa-

tivos datos de aceleración es fundamental que el acelerógrafo pueda ser accionado tan pronto como sea posible y que los tiempos de tardanza del elemento-inerte, sistema de tardanza, impulso del motor sean los más pequeños posibles. De otra manera, si los arranques operan también valores bajo de excitación-período-aceleración, esto puede ser puesto en funcionamiento por vibraciones no sísmicas extrañas o por una serie de sismos pequeños, no destructivos con el peligro de que registros puedan ser largos antes de que ocurra el sismo fuerte.

#### MEDIDA DEL TIEMPO Y REQUERIMIENTOS DE ENERGIA

Aunque una escala absoluta de tiempo no es necesaria para trabajos de movimientos fuertes es necesario tener cuidado en el registro del tiempo y que puedan llevarse a cabo cuidadosos procesos de datos-tales como la determinación de espectros y cálculos-de respuestas. Muchos acelerógrafos contienen un mecanismo para toma uno o dos registro por segundo, con una regulación relativa sobre el registro de 1% de -

error. Puede ser también una ventaja el interconectar los instrumentos localizados en el mismo lugar para que provean datos con la misma regulación de tiempo. Por ejemplo, algunos acelerógrafos en la base y en los pisos superiores de un edificio serían conectados juntos por una marca de regulación común.

Un acelerógrafo requiere una fuente independiente de energía necesaria para su funcionamiento durante la ocurrencia del sismo, independiente del sistema local de energía. Esto se solucionaría por el empleo de un acumulador que cumpla el papel de fuente de energía, y que continuamente sea cargado por la fuente de energía local.

### 2.3. FALLAS SUPERFICIALES Y SUS EFECTOS

#### 2.3.1. ONDAS SISMICAS P y S

Bullen(1963) menciona que considerando el paso de ondas, se tiene la ecuación del movimiento ,

en un sistema de tres coordenadas:

$$\rho f_i = \frac{\partial p_{ij}}{\partial x_j} + \rho X_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

donde:

$f_i$  = aceleración de la onda

$\rho$  = densidad del medio

$x.$  = sistema de coordenadas

$p_{ij}$  = esfuerzos

$X_i$  = fuerza por unidad de masa

Las relaciones entre las fuerzas-deformaciones son:

$$p_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \quad (2)$$

donde:

$e_{ij}$  = componentes de deformación

$A, B$  = constantes que dependen sólo del medio particular y de las condiciones termodinámicas.

$\lambda, \mu$  = constantes de Lamé.

$$\lambda = B \quad \mu = \frac{1}{2} (A - B)$$

$\delta$  = longitud total

$\theta$  = divergencia del vector  $\vec{U}_{ij} = \frac{\partial \vec{U}_i}{\partial x_j}$

De las Ecs. (1) y (2) se tiene:

$$p f i = \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda \theta \delta_{ij} + 2 \mu e_{ij}) + p x_1 \quad (3)$$

La relación longitud del medio-Tensor es la siguiente

$$\delta_{ij} T_i = T_j \quad (4)$$

donde T = Tensor

La relación longitud de la deformación-desplazamiento es:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \vec{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \vec{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

Reemplazando (4) y (5) en (3), da:

$$p f i = \frac{\partial}{\partial x_1} (\lambda \theta) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1}{\partial x_j} \right) \right) + p x_1$$

Como el material es homogéneo:

$$\lambda = \text{cte} \quad \mu = \text{cte} \quad (6)$$

$$\rho f_i = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \bar{U}_i + \rho x_i$$

donde:  $\nabla^2$  es el operador de Laplace,  $\partial^2/\partial x^2$

$$\text{Además: } \theta = \frac{\partial \bar{U}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{U}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{U}_3}{\partial x_3} = \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} \quad (7)$$

Reemplazando (7) en (6):

$$\rho \frac{d \bar{U}_i}{dt^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \bar{U}_i + \rho x_i \quad (8)$$

El desplazamiento  $U$  y la velocidad  $V$  son pequeños.

$$\text{La ecuación de conservación es: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\text{De aquí: } \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} + v_i \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (9)$$

Reemplazando (9) en (8)

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \bar{U}_i + \rho x_i \quad (10)$$

Esta ecuación es linealmente homogénea en  $U_i$ ; y en  $v_i$ . Los valores de  $U_i$  son medidos desde un equilibrio considerado como estandar.

Los valores  $X_i$  son las componentes de fuerzas corporales adicionales por unidad de masa. Los valores  $p_{ij}$  son componentes de esfuerzos adicionales. Esta interpretación está sujeta a la condición de que el esfuerzo total debe ser compatible con las exigencias de la teoría de deformación infinitesimal y de elasticidad perfecta.

De la ecuación (10), considerando  $\rho X_i = 0$ , por no considerar los efectos de posibles fluctuaciones en las fuerzas externas locales durante el paso de las ondas:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial t^2} = (\lambda - \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \vec{u}_i \quad (11)$$

Empleando la Ec. (7) y diferenciando con respecto a  $x_i$ :

$$\rho \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \theta = \left( k + \frac{4}{3} \mu \right) \nabla^2 \theta \quad (12)$$

donde:

$$\lambda = k - \frac{2}{3} \mu$$

Si se aplica la operación curl a (11)

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\text{curl } \vec{U}_i) = (\lambda + \mu) \text{curl} \left( \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) + \mu \nabla^2 \text{curl}(\vec{U}_i)$$

$$\text{curl } \vec{U}_i = \nabla^2 \times \vec{U}$$

Pero un componente típico de cual  $\left( \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right)$  es de

la forma  $\left( \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right)$  el cual es cero.

Así:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \text{curl}(\vec{U}_i) = \mu \nabla^2 \text{curl}(\vec{U}_i) \quad (13)$$

La ecuación de la onda es

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 Y \quad (14)$$

donde:  $c = \text{--- constante}$   $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$

Las Ecuaciones (12) y (13) son semejantes a la Ecuación de la onda.

Por (12) una disturbancia dilatacional ( o irrotacional)  $\theta$  puede ser transmitida a través de la sustancia con la velocidad  $\alpha$

donde

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (14)$$

Una disturbancia rotacional ó equivoluminal puede - se trasmitida con velocidad  $\beta$ , donde:

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (15)$$

Donde  $\alpha$  es la velocidad de la onda P y  $\beta$  es la velocidad de la onda S.

En este caso los parámetros  $\lambda$ ,  $\mu$ , K serían considerados como adiabáticos.

En un caso particular si  $\mu$  es cero,  $\beta$  también es cero. Las ondas rotacionales no son trasmitidas a través de sustancias con rigidez nula.

Sobre la cantidad de la independencia de la trasmisión de las ondas P y S, se pueden suponer los efectos y cuando tienen condiciones correspondientes a un sismo hipotético simple en el cual las ondas P y S viajan a través de medios homogéneos.

En tales circunstancias, el esquema del desplazamiento de una partícula distante que sigue a la ocurrencia

cia del sismo es de la forma de la fig. 4.

Aquí existe intervalo de llegada de las ondas P y S.

El desplazamiento de un punto de la superficie terrestre, causado por un sismo es diferente del esquematizado en la fig.1.

La fig. 5 muestra una porción del gráfico del registro de un movimiento relativo de la tierra.

No existen intervalos de llegada, primero llegan las ondas P y al instante las ondas S.

Las ondas P y S son ondas corporales, la onda longitudinal es la más rápida de los dos tipos de ondas corporales, pero su amplitud es menor. Las ondas P se propagan en cualquier tipo de medio mientras que las ondas S solo se propagan en los medios que tengan rigidez, como es el caso de los sólidos, no así en los líquidos ni gases.

Las ondas S son semejantes a la vibración-transversal de una cuerda(newman, 1963). La partícula de tierra se mueve siempre en dirección normal o transversal a la dirección en que avanza la onda.

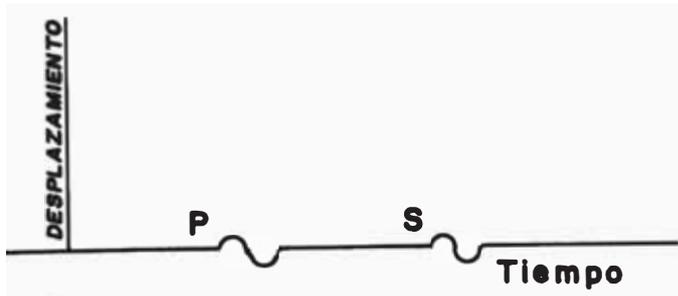


FIG. 4



FIG. 5

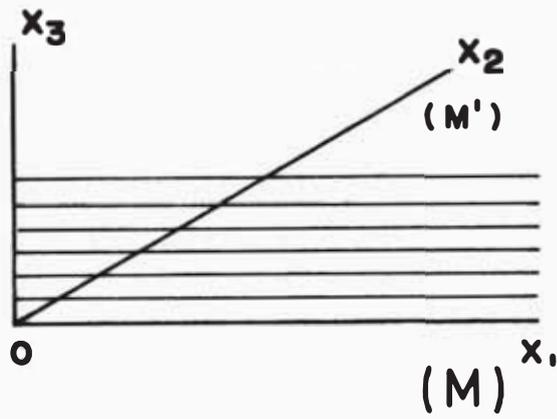


FIG. 6

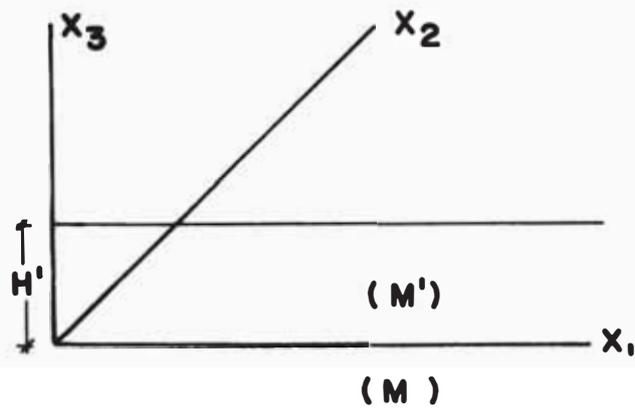


FIG. 7

Las ondas transversales se trasladan con una velocidad de más o menos 0.6 veces la velocidad de las ondas longitudinales P. Con respecto al movimiento efectivo del terreno se puede suponer que los períodos de las ondas S son, a groso modo, alrededor del doble de las de las ondas P.

2.3.2. Las ondas superficiales representan la mayor cantidad de energía inscritas en los sismogramas. Hay dos tipos de ondas superficiales. El tipo más rápido es de la onda L. El otro es la onda R.

Sean  $M$  y  $M'$  dos medios elásticos perfectamente homogéneos separados por un plano horizontal que hace las veces de límite y con extensión infinita,  $M'$  está sobre  $M$ . (Bullen, 1963).

Como sistema de referencia se toma un serie coordenadas cartesianas  $OX_1, X_2, X_3$ ; el origen  $O$  es un punto del límite y  $OX_3$  está normalmente dentro de  $M'$  (ver fig. 6).

Considerando la posibilidad de que una onda viaje a través de la dirección  $OX_1$ , de tal forma que la perturbación es largamente limitada en la cercanía del límite y (b). En un instante todas las partículas paralelas a  $OX_2$ , tienen igual desplazamiento. Considerando (a) la onda es superficial; y considerando (b) se trata de una onda plana.

El caso particular del problema en el cual, el plano limitado es una superficie libre (de tal forma que  $M'$  es reemplazado por el vacío) fue examinado por Rayleigh y las ondas correspondientes son denominadas ondas Rayleigh(R).

Suponiendo ahora que un estado homogéneo  $M'$  es limitado por encima por una superficie libre plana (horizontal) y por debajo por un límite paralelo a una distancia lejana  $H'$ ; el último límite de separación de  $M'$  de otras sustancias homogéneas  $M$ , debajo de  $M'$ , y extendido a una distancia infinita, tiene contacto fuerte.

Love mostró que en esas circunstancias, ondas del tipo de las S pueden ocurrir en superficies

libres. Ese tipo de ondas son las ondas Love(L) cuyo movimiento es perpendicular a la dirección de propagación y se efectúa sólo en el plano horizontal.

2.3.3. La teoría de la repercusión elástica explica la ocurrencia de un sismo como la liberación súbita de la energía acumulada en forma de deformaciones elásticas en una región determinada. La liberación de energía ocurre cuando una deformación de las rocas suficientemente grande fisura la corteza terrestre con la formación de una falla. La fricción entre las caras de la falla genera las ondas de choque que al alcanzar la superficie terrestre la impulsan a vibrar. (Bonilla, 1970).

Esta liberación de energía implica que existe un proceso que acumula energía de deformación en la misma cantidad que la que es liberada por los sismos. Esto es posible si después de que el proceso activo ha cesado, los sismos serían silenciosamente -- continuos , como parte de un proceso lento de relaja-

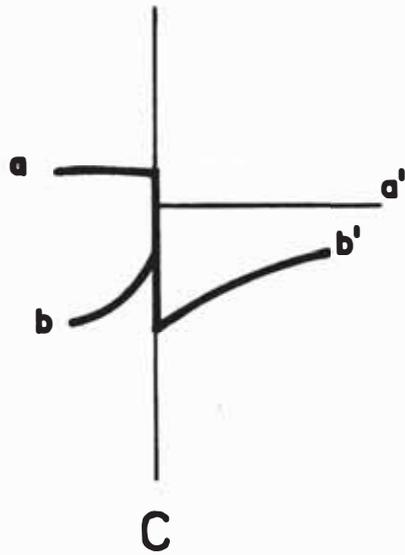
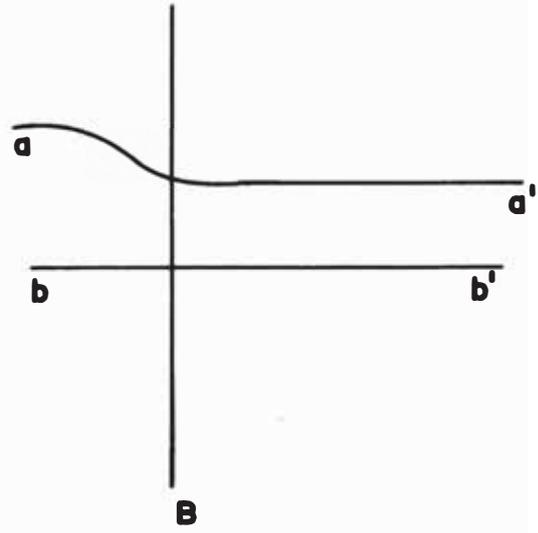
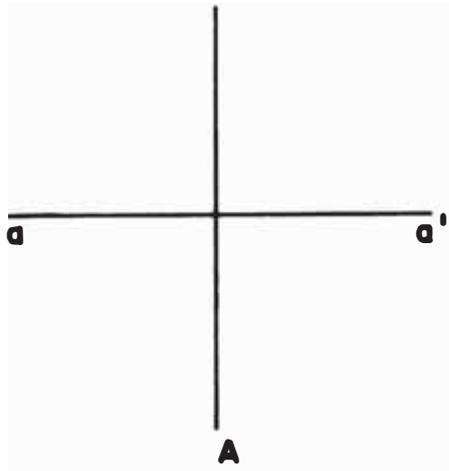
ción, durante el cual un estado no uniforme de fuerzas en la corteza terrestre se acerca a un equilibrio estacionario. El cambio de fuerzas resultantes de falla de deformación también incluye un incremento de fuerzas en las regiones subterráneas, en las cuales se relajan en forma gradual. Así los cambios lentos en las fuerzas observable en la superficie de la tierra pueden indicar un incremento de energía de deformación por un proceso tectónico activo o esto puede indicar una redistribución de energía de deformación por un proceso de relajación. Desde un punto de vista amplio, los focos sísmicos superficiales, son manifestaciones de un proceso de fallamiento.

Las fallas de fuerzas de corte ocurren a lo largo de planos de fallas. Donde tales planos de falla intersectan a la superficie terrestre, las evidencias de fallas de desplazamiento ocurridos son generalmente visibles y también lo son las indicaciones de fractura y molienda de roca durante fallas de fuerza. La intersección del plano de falla con el plano horizontal local define una línea de intersección empleada en la descripción del movimiento relativo de

dos lugares de la falla durante una falla de fuerza. A un punto sobre el plano de falla, el desplazamiento relativo de dos lugares de falla, el desplazamiento relativo de dos lugares de la falla define una línea, cuya longitud y dirección son la amplitud y la dirección del desplazamiento de la falla.

Los sismos de origen tectónicos se pueden considerar como producidos por una fractura en la corteza terrestre o un cambio brusco en la situación de equilibrio de los esfuerzos en la parte superior del manto. La teoría del rebote elástico de Reid relaciona un terremoto con la relajación súbita de los esfuerzos acumulados por la deformación elástica a los dos lados de una zona de fractura (Udías, 1971).

A) Representa la situación anterior a la acumulación de esfuerzos. Al acumularse los esfuerzos se produce una deformación(B) del terreno que se manifiesta en la deformación de la línea aa'. En esta situación situamos la línea recta bb'. Al producirse la ruptura a lo largo de la falla(c) el material



**FIGURA 8**

vuelve al estado original de no deformación deformando a su vez a la línea bb'. Esta teoría fué sugerida por la ruptura a lo largo de la falla de San Andrés producida por el terremoto de San Francisco en 1906.

#### 2.4. PARAMETROS FOCALES

2.4.1. El foco es el lugar de la corteza terrestre, en el cual se origina un sismo, también es denominado hipocentro. La proyección del foco en la superficie terrestre es llamada epicentro.

Del foco, donde tiene lugar uno o varios de los fenómenos perturbadores, se propagan en todas las direcciones las ondas sísmicas corpóreas, y éstas, - cuando alcanzan la superficie terrestre, dan origen a un nuevo tipo de ondas denominadas ondas superficiales, formadas por interferencia constructiva.

#### 2.4.2. EPICENTRO

El epicentro determinado instrumentalmente puede ser localizado por medio de la expresión:

$$(t_s - t_p) = \left( \frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_p} \right) d$$

donde  $t_s$  y  $t_p$  son los tiempos de viaje del registro del sismógrafo de las curvas de las ondas de corte y la de las ondas de compresión, respectivamente, y  $d$  es la distancia viajada por las ondas, por ejemplo  $d = v_s \times t_p$ ;  $d = v_p \times t_p$ . La cantidad  $(t_s - t_p)$  es determinada del sismógrafo como la diferencia entre el tiempo inicial de arribo de las ondas de corte y de compresión y entonces las velocidades de onda  $v_s$  y  $v_c$  son conocidas, la distancia  $d$  al epicentro puede ser determinada. Valores aproximados de las velocidades en granito son  $v_c = 3.36$  km/seg  $v_p = 5.57$  km/seg. y la velocidad de la onda superficial Rayleigh es  $v_r = 3.97$  km/seg y la de la onda Love es  $v_l = 4.43$  km/seg. Bullen (1963).

El epicentro es localizado por determinación de distancias de diferentes estaciones sismográficas. El cuidado con que el epicentro pueda ser calculado depende básicamente del cuidado con que son conocidas

las velocidades de las ondas y es preferible que el epicentro sea localizado por estaciones sismográficas cercanas. En la actualidad la localización de epicentros tiene un probable error de más o menos - de 9 kms. bajo circunstancias favorables y mas o menos 32 kms. en circunstancias no favorables.

Es importante reconocer que el epicentro y el hipocentro, determinados instrumentalmente, no indican al centro de liberación de la energía, sólo indican el punto donde empieza la falla de deslizamiento.

Byerly (1933) menciona que si es posible hallar dos estaciones en las cuales las ondas P arriben exactamente al mismo tiempo. Entonces el epicentro se encuentra sobre un círculo grande, cuyos puntos son equidistantes de las dos estaciones. Si otro par de estaciones pueden registrar la llegada de las ondas P simultáneamente, otro gran círculo puede ser dibujado. Esos dos círculos se intersecan en dos puntos, pero los intervalos P-S muestran claramente el lugar del epicentro. Esto ofrece un mé-

todo de localización de epicentros con el uso de las curvas. En todo caso se efectúan tanteos. Galitzin desarrolló un método para la localización del epicentro de los registros de una estación. Para ello se debe tener muy buenos registros de las tres componentes del movimiento de la estación. El método se basa en el carácter longitudinal de la primera onda longitudinal de la primera onda registrada.

Si la primera cresta es bien registrada en la dos componentes horizontales, la componente horizontal del movimiento de la tierra puede ser obtenido por suma de vectores. Si las constantes de esos dos instrumentos son las mismas, y si el período de la primera onda registrada es el mismo, las amplitudes trazadas pueden dar el arco de un gran círculo, asociando la estación y el epicentro. Esto distingue la línea de vibración, pero deja duda en cual de las dos direcciones es la del epicentro. La referencia a la componente vertical es la que determina entre las dos.

Entonces del intervalo P-S y de las tablas, se encuentra una distancia epicentral y se encuentra el epicentro.

### 2.4.3. MAGNITUD E INTENSIDAD

#### 2.4.3.1. Magnitud

Probablemente, la primera pregunta que surge al discutir sobre un sismo determinado es Cuán grande fue? . Para ello es necesario distinguir claramente la diferencia entre la intensidad y la magnitud de un sismo. Mientras que la intensidad es definida por los efectos del sismo y por lo tanto es un concepto netamente cualitativo, la magnitud es una cantidad determinable instrumentalmente, relacionada íntimamente a la energía liberada total durante el sismo.

Un gran sismo es asociado con una falla de deslizamiento sobre una gran área de falla, con una gran liberación de energía de deformación en la forma de ondas sísmicas y con una gran área sujeta a golpes de fuerza. Es importante para propósitos de Ingeniería ser capaz de describir en una forma cuantitativa la magnitud del sismo. En 1935, C.F. Richter del Instituto de Tecnología de California definió la magnitud de

un sismo como:

$$M = \log_{10} \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

donde M es la magnitud del sismo, A es la máxima amplitud registrada por un sismógrafo Wood-Anderson a una distancia de 100 kms. del centro de la disturbancia, y  $A_0$  es una amplitud de un milésimo un milímetro. En la práctica, los registros deben ser hechos a distancias que sean grandes comparadas a las dimensiones del área de falla deslizada. Los registros son así - extrapolados a una distancia de 100 kms. del centro del golpe. Para mejores resultados un valor promedio de Mes determinado de un número de registros de diferentes estaciones sismológicas.

Los sismos de magnitud 5.0 o mayor, generan movimientos de tierra suficientemente severos que son potencialmente destructores para las estructuras. Para magnitudes menores que 5.0 el movimiento del terreno es improbable que sea destructivo porque es de duración corta y aceleración moderada.

Después de varios intentos para unificar el concepto de magnitud, se puede expresar en una forma general, mediante la fórmula: (Huaco, 1972)

$$M = \log (\Delta / T) \quad Q(\Delta, h) + \Sigma \delta M$$

donde A = amplitud del movimiento del suelo en micrones, para cada tipo de onda.

T = período de la onda en segundos

= distancia epicentral en grados o en km.  
de acuerdo al caso.

$Q(\Delta, h)$  = función de calibración, que corresponde a la variación de la amplitud con la distancia al foco.

$\Sigma \delta M$  = correcciones a efectuar:

$-\delta M_h$  = corrección por profundidad focal

$-\delta M_s$  = corrección por estación

$-\delta M_m$  = corrección por mecanismo focal

- Los valores de A y T se obtienen del sismograma
- La función de calibración reduce las amplitudes es comparable directamente, depende de la distancia epicentral y de la profundidad.

La expresión general de la función de calibración es:

$$Q(\Delta, h) = a \log \Delta + b$$

a y b son valores que determinan empíricamente. Varios investigadores han dado expresiones para la función de calibración siendo las más conocidas:

$Q(\Delta, h) = 1.73 \log \Delta + 2.71$	$5^\circ \leq \Delta \leq 20^\circ$	Tsuboi (1954)
$Q(\Delta, h) = 1.50 \log \Delta + 3.20$	$\Delta > 4^\circ$	Salovyov y Shebalin (1957)
$Q(\Delta, h) = 1.66 \log \Delta + 3.45$		Vanek y Stalamer (1957)
$Q(\Delta, h) = 1.71 \log \Delta + 3.07$		
$Q(\Delta, h) = 1.27 \log \Delta + 3.81$		Christoskov (1965)

Para ondas corpóreas ( P y S ), la función de calibración está basada en observaciones experimentales de la amplitud y período.

Recientemente Duda (1970) proporciona una serie de valores para la relación amplitud-distancia epicentral. Estas tablas son teóricas, asumiendo que la tierra es esférica, isotrópicas, que cubren distancias epicentrales de  $0^\circ$  a  $100^\circ$  y para focos sísmicos de 21 profundidades (0,15,40,50,etc, hasta 300 kms)

Las correcciones se calculan de las siguientes expresiones:

1.- Corrección por profundidad focal:

$$-\delta M_h = M_{p,s}^s - M_{p,s}^h$$

donde:  $M_{p,s}^s$  = magnitud de las ondas P ó S en la superficie.

$M_{p,s}^h$  = magnitud de las ondas P ó S en profundidad focal.

para ondas superficiales:

$$\delta M_h = M_s^s - M_{p,s}^h$$

corrección válida hasta 150 kms.

2.- Corrección por estación

valor medio:  $M = \sum M_i / N$

donde:

$M_i$  = diferentes magnitudes medidas

$N$  = número de estaciones sísmicas

3.- Corrección por mecanismo focal

$$\delta M_w = - (\sum \log (2xy / 0.424) i) / N$$

XY = relacionados con la orientación del par de -  
fuerzas y coordenadas geográficas.

### Relación Energía-Magnitud

La determinación de la cantidad de energía liberada mediante las ondas sísmicas tiene gran importancia en la sismología.

Se ha demostrado (Bullen, 1963) que la energía está dada por la fórmula:

$$E = 2 \pi^2 \rho \lambda (A^2/T^2)$$

donde:

E = Energía liberada

$\rho$  = densidad del lugar

$\lambda$  = longitud de onda sísmica

A = amplitud

T = período

Con esta ecuación es difícil calcular la cantidad de energía liberada, porque en ella se incluyen parámetros propios del lugar del foco, lo cual, no permite

aplicar correctamente la fórmula.

Es por ello que se busca relacionar la magnitud del sismo con la energía liberada.

La magnitud es relacionada evidentemente con la energía liberada del foco sísmico en la forma de ondas elásticas.

Ritcher (1958) expresa que la relación magnitud-energía toma la siguiente forma:

$$\log E = 11.4 + 1.5 M$$

#### 2.4.3.2. Intensidad

**Intensidad** es la violencia del movimiento del suelo en un lugar determinado del área sacudida por un sismo, y se cuantifica de los efectos y/o daños observados en cada lugar. Es por lo tanto, una medida que se basa en la apreciación personal, que es un criterio subjetivo. La intensidad es una medida subjetiva del sismo.

Desde el punto de vista de la intensidad, los sismos se dividen en macrosismos y microsismos, los primeros son sensibles al hombre, en cambio los segundos, sólo son detectados por instrumentos sísmicos. La intensidad se mide por la Escala de Mercalli. Otras escala por la de Rosi-Forel y la de Cancani-Mercalli-Sieberg, que cuenta con doce grados, correspondiéndole a cada una aceleración aproximada y una explicación del fenómeno que perciba el hombre en cada grado.

Actualmente se emplea la Escala Modificada de Mercalli (EMM) que fue dada a conocer por H.O. Wood y Frank Neumanen 1931 (Sanhueza, 1969).

#### 2.4.3.3. Intensidad y aceleración

Gutenberg y Richter (1941) lograron en California la siguiente relación entre grado de intensidad y la aceleración horizontal del sismo:

$$\log a = \frac{I}{3} - \frac{1}{2}$$

$$a = \text{gal}$$

$$I = \text{int. E M M}$$

Esta relación sólo es válida para sismos de profundidad normal y da valores bastante erráticos para intensidades muy grandes o muy pequeñas debido a la imprecisión en la determinación de  $I_0$ .

#### 2.4.3.4. Intensidad -Energía

En 1955, N.V. Shebolin, indicó una relación entre energía, intensidad y profundidad focal.

De un estudio de 56 sismos, él derivó:

$$\begin{aligned} 0.9 \log E - I &= 3.8 \log h - 3.3 & h < 70 \text{ kms.} \\ \text{y } 0.9 \log E - I &= 3.1 \log h - 4.4 & h > 80 \text{ kms.} \end{aligned}$$

donde:

$E$  = energía medida en megajoules (unidades de  $10^9$  erg).

$h$  = profundidad hipocentral en kms.

$I$  = máxima intensidad en la superficie (M.M)

## 2.5. DISEÑO DE ESPECTROS

Fundamentalmente, el comportamiento de una estructura durante un sismo es un problema de vibración. Los movimientos sísmicos del terreno conducen a la estructura a vibrar y la amplitud y distribución de las deformaciones dinámicas, y su duración, son de incumbencia del ingeniero.

El objetivo principal de los requerimientos de los códigos sísmicos es que la estructura no sufra el azar de los movimientos sísmicos. Algunas destrucciones pueden ser subsanadas, pero no sufrir ningún deterioro durante el sismo. Durante temblores pequeños que tienen una significativa probabilidad de ocurrencia durante la vida de la estructura, las vibraciones pueden estar en el rango elástico con amplitudes no destructivas, pero durante fuertes sismos, los elementos pueden padecer esfuerzos plásticos y pueden tener algunas rajaduras.

Los cálculos de las vibraciones sísmicas inducidas de las estructuras pueden ser efectuadas, y ellos indicarían la naturaleza general y la amplitud de las

deformaciones que puedan ser producidas durante los sismos.

Los actuales criterios de diseño sísmico - pueden ser basados en las siguientes consideraciones: la probabilidad de ocurrencia de los sismos; las características de los movimientos del terreno; la naturaleza de las deformaciones estructurales; el comportamiento de los materiales de los edificios cuando están sujetos al tránsito de los esfuerzos oscilatorios; la naturaleza de las destrucciones de los edificios que puedan ser subsanadas, y el costo de reparación de las destrucciones comparado con el costo de proveer resistencia adicional a los edificios.

Definir el espectro de respuesta, supone que una aceleración del terreno es aplicada a la base de un sistema de movimiento de un grado de libertad. El comportamiento del sistema medido, por ejemplo, por sus desplazamientos máximos dependería del período-natural y el amortiguamiento del sistema. Para una excitación dada y un valor particular de amortiguamiento, el desplazamiento máximo del sistema

de movimiento de un grado de libertad vendría a ser graficado en función del período natural del sistema. Una familia de tales curvas, para varios valores de amortiguamiento, formarían entonces el espectro de respuesta. Dado el espectro de respuesta, el movimiento máximo de una estructura particular de un grado de libertad de período y amortiguamiento conocidos puede ser directamente determinado, como veremos más adelante.

El espectro de respuesta revela en forma directa los aspectos del movimiento sísmicos del terreno que son de incumbencia primaria del ingeniero estructural y la preparación de tales curvas de espectros de respuesta es uno de los principales usos de los registros de acelerogramas de sismos.

Las aceleraciones registradas del terreno y el espectro de respuesta de sismos ocurridos proveen una sólida base para el diseño racional de estructura que soporten sismos. Se debe observar que un espectro de respuesta calculado no es lo mismo - que un espectro de diseño especificado. El espectro

de respuesta es una manera conveniente de la descripción de un movimiento sísmico particular mediante la gráfica en un sistema de coordenadas de la velocidad máxima de respuesta, aceleración máxima de respuesta o el desplazamiento máximo de respuesta de un oscilador, y este valor es un valor instantáneo que puede no ser detectado durante el sismo. Por ejemplo, no se puede considerar como la aceleración de diseño a un pico de aceleración, por ejemplo del 25%g, pero que se encuentra aislado, mientras los picos predominantes son del orden, digamos, del 10%g.

El espectro de diseño no es una especificación de un movimiento sísmico particular; es una especificación de los esfuerzos estructurales. Esto es semejante a los requerimientos de códigos de edificios, para encontrar fuerzas que, en efecto, especifican los esfuerzos de edificios.

a) Espectro de Fourier

El espectro de amplitud de Fourier sirve para representar la frecuencia que satisface a una fun-

ción, tal como un acelerograma. La oscilación lineal simple de masa  $m$  y rigidez  $k$ , mostrada en la fig. 9 tiene la ecuación de movimiento:

$$m \ddot{X}_r + k X_r = -m \ddot{X}_g$$

donde  $X_r$  es el desplazamiento relativo y  $\ddot{X}_g$  es la aceleración de la base.

La respuesta vibratoria es dada por la expresión para el desplazamiento relativo en el tiempo  $t$ :

$$X_r(t, \omega) = \frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{X}_g(\gamma) \sin \omega_d (t - \gamma) d\gamma \quad (1)$$

donde  $\omega_d^2 = k/m = (2\pi/T)^2$  y  $T$  es el período natural de vibración. Esta expresión es también la respuesta vibratoria del oscilador cuando la base es fijada y hay una fuerza ( $-m\ddot{X}_g$ ) aplicada a la masa, como se muestra en la fig. 10. Para este problema, la energía total del oscilador es  $E = \frac{1}{2} m \dot{X}_r^2 + \frac{1}{2} K X_r^2$

la suma de las energías cinética y potencial. Empleando la Ecuación 1, la energía total puede ser escrita en la siguiente forma:

$$E(t, \omega) = \frac{1}{2} m \left[ \left( \int_0^t \ddot{X}_g \sin \omega_d \gamma d\gamma \right)^2 + \left( \int_0^t \ddot{X}_g \cos \omega_d \gamma d\gamma \right)^2 \right] \quad (2)$$

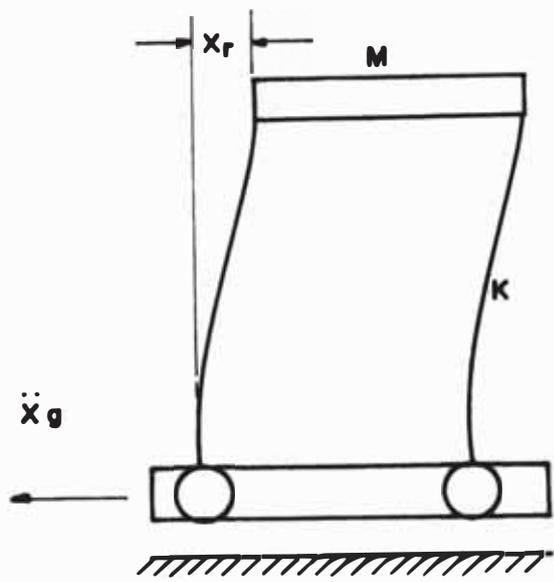


FIG. 9

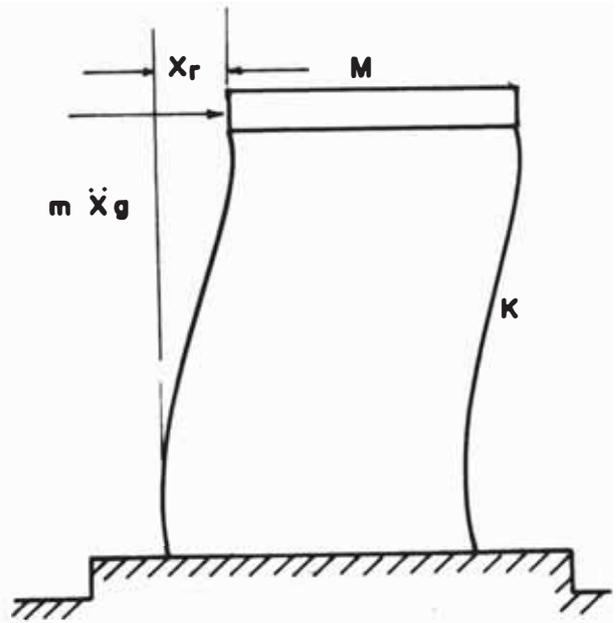


FIG. 10

La raíz cuadrada del doble de la energía por unidad de masa es:

$$\sqrt{\frac{2E(t, \omega)}{m}} = \left[ \left( \int_0^t \ddot{X}_g \sin \omega dY \right)^2 + \left( \int_0^t \ddot{X}_g \cos \omega dY \right)^2 \right] \quad (3)$$

Si la duración de  $X_g$  es de  $t = 0$  á  $t = t_1$ , la raíz cuadrada del doble de la energía por unidad de masa en el tiempo  $t_1$  - es:

$$\sqrt{\frac{2E(t_1, \omega)}{m}} = \left[ \left( \int_0^{t_1} \ddot{X}_g \sin \omega dY \right)^2 + \left( \int_0^{t_1} \ddot{X}_g \cos \omega dY \right)^2 \right] \quad (4)$$

El miembro derecho de la ecuación 4 es función de  $w = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ .

Cuando éste es evaluado y ploteado como una función de  $w$  ó  $T$  ó  $f$ , es denominado el Espectro de Amplitud de Fourier. Es habitual plotear los espectros de sismos en función del período  $T$ . Un espectro de amplitud de Fourier de un acelerograma de sismo es mostrado en la fig. 14.

Llamando  $E_1(s)$  a la envolvente de la curva relativa, es definida por Brady como:

$$E_1(s) = \left\{ \left[ \left( \int_0^s \ddot{X}_g \sin \omega dY \right)^2 + \left( \int_0^s \ddot{X}_g \cos \omega dY \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}$$

siendo el tiempo total del registro sísmico. Para un

registro  $a(t)$  de duración  $s$ , esta expresión sólo depende de  $w_d$  y toma valores diferentes en función de los valores deseados del período  $T$ .

La transformada de Fourier de un registro de longitud  $t$ , es dada por:

$$\text{TF } [\ddot{X}_g(t)] = \int_0^t \ddot{X}_g(t) e^{-i\omega t} dt$$

De esta ecuación, el espectro de amplitud de Fourier de un registro  $a(t)$  de duración  $t$ , es dado exactamente por la misma expresión con  $w_d$  reemplazado por  $w_n$ . Esto indica que el espectro de amplitud de Fourier del registro  $\ddot{X}_g(t)$  es dado aproximadamente por el valor final de la envolvente de la respuesta de la velocidad relativamente amortiguada a la aceleración de la base  $a(t)$  numéricamente igual a  $X_g(t)$ .

#### b) Espectro de Respuesta

Las integrales de la ecuación 4 son evaluadas en el fin del acelerograma a  $t = t_1$ , y el espectro de Fourier es así una medida de la energía  $E(t, w)$

ocurrirá en el tiempo  $t_m = t_1$ . Desde un punto de vista de la Ingeniería Sismológica, la máxima energía es de mayor interés que la energía final, porque es una cuantificación del máximo desplazamiento, y aquí, el máximo corte de la base y el máximo esfuerzo sísmico en la estructura. Si la ecuación 2 es evaluada en el tiempo  $t_m$ , el cual proporciona el máximo valor de la energía  $E(t_m, w)$  y ésta es ploteada como una función del período, la curva es llamada el Espectro de Respuesta de Energía. La cantidad  $\sqrt{\frac{2E(t_m, w)}{m}}$  es la máxima velocidad posible del oscilador y cuando es ploteado en función del período se le conoce como el Espectro de Respuesta de Velocidad. Esto es graficado en la fig. 10 en la cual sus condiciones son semejantes al Espectro de Fourier, pero su amplitud es un poco mayor.

Si el oscilador de la fig. 9 tiene amortiguamiento viscoso, su respuesta está dada por :

$$x(t, \omega, \eta) = \frac{1}{\omega_n} \int_0^t \ddot{x}_g(\gamma) e^{-\eta \omega_n (t-\gamma)} \text{sen } \omega_n (t-\gamma) d\gamma \quad (5)$$

donde  $\eta$  es la fracción de amortiguamiento crítico y

$$W_n = W_d \sqrt{1 - n^2}$$

Para  $n < 0.2$ , el valor de  $W_n$  es, para propósitos prácticos, el mismo valor de  $W_d$ . El máximo valor de desplazamiento ocurre en  $t_m$ , esto es  $x(t_m, W, n)$ .

El cual es denominado el Espectro de Respuesta de Desplazamiento  $S_d$ . Es habitual graficar  $S_d$  en función del período  $T$ , para algunos valores de  $n$ . La máxima velocidad es  $\dot{x}(t_m, W, n)$ , el que es llamado el Espectro de Respuesta de Velocidad  $S_v$ . La aceleración relativa máxima no es de interés, pero si lo es la aceleración absoluta máxima  $(\ddot{x}_r + \ddot{x}_g)_{\max}$ . La fuerza máxima ejercida sobre la masa  $m$  es  $kx_r(t_m, W, n)$  y la aceleración absoluta máxima es  $(k/m) x_r(t_m, w, n)$

Entonces, el Espectro de Aceleración Absoluta es

$$S_a = (k/m) S_d = \omega^2 S_d = (2\pi/T)^2 S_d$$

El llamado Espectro de Suedo Velocidad es - definido como  $PS_v$ , donde:

$$\left(\frac{T}{2\pi}\right) S_a = PS_v = \frac{2\pi}{T} S_d \quad (6)$$

El significado físico de  $PS_v$  puede ser explicado co-

mo sigue:

El desplazamiento máximo corresponde a la condición de energía cinética cero y energía potencial máxima

$\frac{1}{2} k S_d^2$  Si la energía fuese expresada en la forma de energía cinética:  $\frac{1}{2} m (\dot{x}_r)^2 = \frac{1}{2} k S_d^2$  la velocidad relativa máxima sería:

$$\dot{x}_r = \sqrt{\frac{k}{m}} S_d = \left( \frac{2\pi}{T} \right) S_d = P S_v$$

Para más movimientos sísmicos del suelo cuando  $T \rightarrow t_1$ , puede existir una marcada diferencia. Es obvio que en el límite, como  $T$  viene muy grande  $P S_v = 0$ , mientras  $S_v \rightarrow (\dot{x}_g)_{\text{máx.}}$

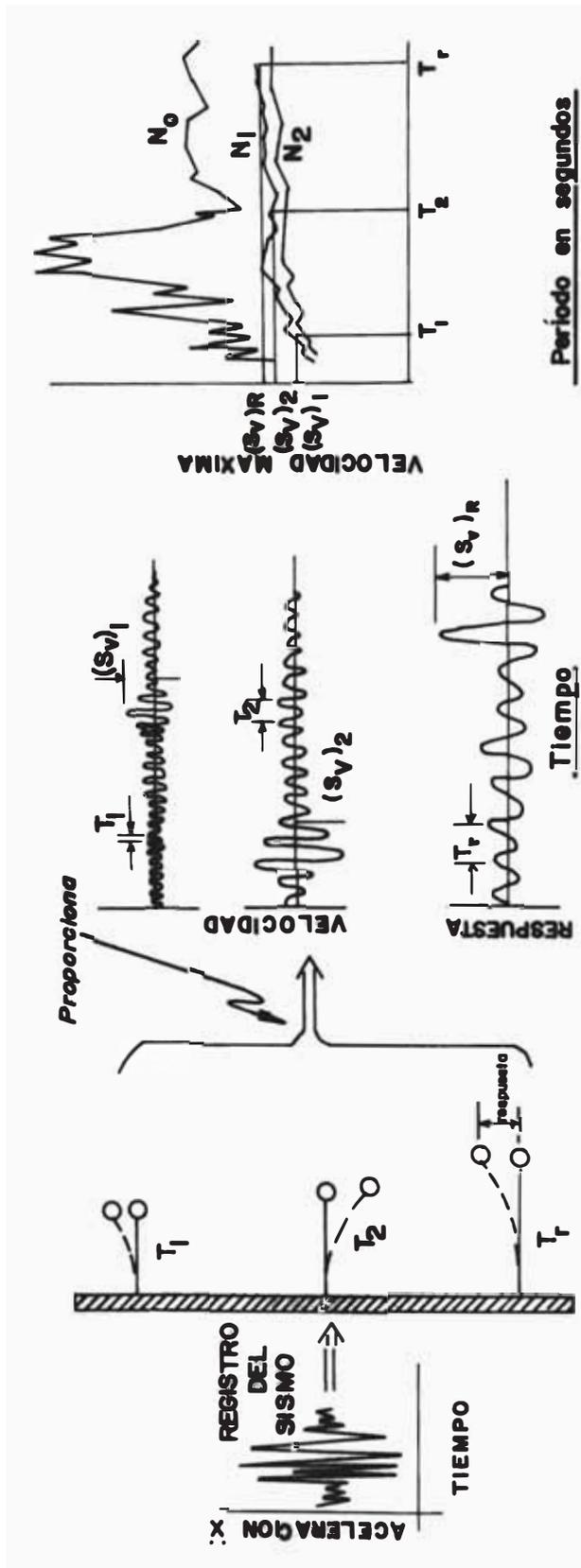
Una representación esquemática del concepto del espectro de respuesta es mostrada en la Fig. 11 Para un registro de aceleración del terreno  $\ddot{x}_g(t)$  y para un particular  $n$  y  $T$ , la ecuación que define  $x_r(t)$  puede ser evaluada y el máximo valor,  $S_v$ , puede ser observado. El gráfico de tal máxima, para un rango de períodos estructurales,  $T$ , produce un gráfico de respuesta de velocidad máxima, el cual es deno-

minado el Espectro de Velocidad máxima. Una familia de tales curvas espectrales puede ser obtenido, correspondiendo a valores diferentes de amortiguamiento  $n$ .

Por característica propia de la naturaleza compleja de la aceleración del terreno, el cálculo requerido para la evaluación del espectro de respuesta es extremadamente grande y es mejor efectuarlo por computadora analógica o digital.

Como se observó previamente, el espectro de respuesta también puede ser graficado en término de desplazamiento ó aceleración.

Como mencionabamos anteriormente, las curvas espectrales de respuesta son en la práctica determinadas ya sea por las computadoras analógicas o por el empleo de computadoras digitales de alta velocidad. Esta computación digital de alta velocidad, es la de empleo más frecuente en los países industrializados. Los cálculos espectrales, aunque simples en principio, son laboriosos y costosos, considerando la forma ac-



SISTEMAS S. D. F.  
 DE VARIOS PERIODOS  
 Y AMORTIGUAMIENTO CONSTANTE

RESPUESTA DEL SISTEMA ESPECTRO DE RESPUESTAS

INTERPRETACION ESQUEMATICA DEL ESPECTRO DE RESPUESTAS

FIG. 11

tual como registrados los datos. Una gran ventaja de la computadora digital, es que los datos serían provehidos por registros en cinta. Tal registro en cinta magnética vendría a ser fácilmente digitizado por un programador.

#### 2.6. ENSAYOS DINAMICOS

El problema de la determinación de la respuesta de las estructuras que son excitadas por fuerzas, puede ser planteado y resuelto, en teoría, en términos muy generales, para casos que incluyen deformaciones plásticas.

Efectuar un empleo práctico del análisis, sin embargo, requiere que la información cuantitativa pueda ser evaluada en base a las propiedades dinámicas de la estructura base, tales como los períodos naturales de vibración, las formas de modos, la disipación de energía y los límites de cede. Tales propiedades -

dinámicas dependen de varios detalles del comportamiento del material y de la configuración estructural que no son afectables por un tratamiento analítico. La determinación experimental directa de tales características dinámicas se convierte en una necesidad de la etapa actual del desarrollo del tema.

Un criterio del estudio actual es el ensayo dinámico de las estructuras desde el punto de vista especial de la necesidad de conocer su comportamiento para su empleo en el diseño sísmo resistente

Esa es una aplicación importante en la que al modelo estudiado se le puede analizar su comportamiento dinámico y los modelos pueden adaptarse a los ensayos. En general, sin embargo, las respuestas dinámicas de las estructuras son funciones de detalles tales como la rigidez y la pérdida de energía - en puntos y conexiones individuales que impiden la posibilidad de contestar a importantes preguntas, valiéndonos sólo de los ensayos dinámicos. De hecho, las grandes estructuras pueden ser modelos convenientes, porque permiten presentar a escala los mismos-

problemas de los prototipos en los ensayos.

En vista de las importantes ventajas que pueden poseer los modelos para muchas investigaciones, uno de los objetivos de los ensayos a escala puede ser obtenido estableciendo una correcta base para tales estudios en los modelos. Para este propósito es necesario llevar siempre una cerrada coordinación del modelo con el ensayo, a escala, de tal manera que puede efectuarse una completa evaluación de la aplicabilidad y precisión de modelos de varios tamaños.

En los ensayos dinámicos, son determinadas las propiedades dinámicas de las estructuras. Esto incluye a los desplazamientos cortos. Los mejores parámetros son los períodos naturales de vibración y todos los modos significativos, los modelos de modos correspondientes y la cantidad de disipación de energía y el amortiguamiento asociado con cada modo.

En una segunda categoría de ensayos, vienen los estudios de comportamientos no lineales, tales como las investigaciones de condiciones de ceda y la

determinación de la disipación de energía, también se incluyen en esta categoría los estudios de los criterios de falla y de los detalles de debilitamiento tales como fractura, impacto y fatiga.

### 2.7. RESPUESTAS SISMICAS DE LAS ESTRUCTURAS

El movimiento de una estructura flexible, esquematizada en la Fig. 13 cuya base es excitada por una aceleración mantenida  $\ddot{X}_g$ , es gobernado por la ecuación diferencial siguiente:

$$m\ddot{X}_r + C\dot{X}_r + KX_r = -m\ddot{X}_g = F(t) \quad (1)$$

donde  $F(t)$  representa la fuerza de inercia aplicada como una fuerza perturbadora a la masa del sistema y  $X_r$  es el desplazamiento relativo entre la masa y el terreno en movimiento.

$\ddot{X}_g$  es la componente horizontal de la aceleración de la base, la que se asume igual a la acelera-

ción del terreno e idéntica al registro aceleración-período obtenido de un acelerógrafo durante un movimiento sísmico.

Por una función general de fuerza transitoria  $F(t)$ , el desplazamiento relativo de respuesta  $X_r(t)$  puede ser obtenido en función del tiempo  $(t)$  de la integral de Duhamel

$$X(t) = \int_0^t \frac{F(\gamma)}{m\omega_d} e^{-n\omega_n(t-\gamma)} \text{sen } \omega_d(t-\gamma) d\gamma \quad (2)$$

$$X_r(t) = - \frac{1}{\omega_n \sqrt{1-n^2}} \int_0^t \ddot{x}_g(\gamma) e^{-n\omega_n(t-\gamma)} \text{sen } \omega_n \sqrt{1-n^2}(t-\gamma) d\gamma \quad (3)$$

En esta ecuación se puede notar que la respuesta dinámica de la estructura es función del carácter de la estructura, definida por su período y amortiguamiento, y del carácter de la aceleración del terreno.

La expresión exacta para la velocidad relativa sigue directamente de una derivación simple de la Ecuación 3, observando que:

$$\dot{X}_r(t) = - \int_0^t \ddot{x}_g(\gamma) e^{-n\omega_n(t-\gamma)} \cos \omega_n \sqrt{1-n^2}(t-\gamma) d\gamma + \frac{n}{\sqrt{1-n^2}} \int_0^t \ddot{x}_g(\gamma) e^{-n\omega_n(t-\gamma)} \text{sen } \omega_n \sqrt{1-n^2}(t-\gamma) d\gamma \quad (4)$$

Una segunda derivación produce  $\ddot{X}_r(t)$ ; el término  $\ddot{X}_g(t)$ , el cual viene del límite variable de integración, se presenta en este resultado. Entonces, desde que  $\ddot{X}(t) = \ddot{X}_g(t) + \ddot{X}_r(t)$ , el término  $\ddot{X}_g(t)$  se considera para la aceleración absoluta:

$$\begin{aligned} \ddot{X}(t) &= \ddot{X}_g(t) + \ddot{X}_r(t) \\ \ddot{X}(t) &= \frac{\omega_n(1-\eta^2)}{\sqrt{1-\eta^2}} \int_0^t \ddot{X}_g(\gamma) e^{-\eta\omega_n(t-\gamma)} \operatorname{sen}(\omega_n\sqrt{1-\eta^2}(t-\gamma)) d\gamma + \\ &+ 2\omega_n\eta \int_0^t \ddot{X}_g(\gamma) e^{-\omega_n\eta(t-\gamma)} \operatorname{cos}(\omega_n\sqrt{1-\eta^2}(t-\gamma)) d\gamma \quad (5) \end{aligned}$$

El desplazamiento relativo tiene importancia en el diseño puesto que los esfuerzos en la estructura son directamente proporcionales a esos desplazamientos. La velocidad relativa tiene significado en el cálculo de la respuesta sísmica porque es una medida de la energía elástica en los elementos elásticos del sistema. La aceleración absoluta define la fuerza sísmica desarrollada y es importante en una situación en la que medidas experimentales son consideradas como una comprobación del cálculo, puesto que la respuesta estructural que es más fácil de ser cuantificada es la aceleración absoluta.

ESPECTRO DE RESPUESTA SISMICA

Representando el valor absoluto del desplazamiento relativo máximo experimentado por la estructura durante un sismo por  $S_d$ , y similarmente el valor de la velocidad relativa máxima y el de la aceleración absoluta máxima por  $S_v$  y  $S_a$  respectivamente, podemos escribir de las Ecuaciones 3,4,y 5 que:

$$S_d = \left| \frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{x}_g(\gamma) e^{-n\omega_n(t-\gamma)} \text{sen } \omega_d(t-\gamma) d\gamma \right|_{\max} \quad (6)$$

$$S_v = \left| \int_0^t \dot{x}_g(\gamma) e^{-n\omega_n(t-\gamma)} \left[ \cos \omega_d(t-\gamma) - \frac{n}{\sqrt{1-n^2}} \text{sen } \omega_d(t-\gamma) \right] d\gamma \right|_{\max} \quad (7)$$

$$S_a = \left| \omega_d \int_0^t \ddot{x}_g(\gamma) e^{-n\omega_n(t-\gamma)} \left[ \left(1 - \frac{n}{1-n^2}\right) \text{sen } \omega_d(t-\gamma) + \frac{2n}{\sqrt{1-n^2}} \cos \omega_d(t-\gamma) \right] d\gamma \right|_{\max} \quad (8)$$

Se puede observar que para un sismo dado - esas cantidades depende de  $n$  y  $\omega_n$ . Los gráficos de  $S_d$ ,  $S_v$  y  $S_a$  comparados con el período natural no amortiguado para varias fracciones de amortiguamiento crítico, definen los espectros de respuesta sísmica para desplazamiento relativo, velocidad relativa y aceleración absoluta respectivamente.

Si ahora consideramos que el amortiguamiento es pequeño de modo tal que  $\sqrt{1-n^2} \approx 1$  y que se puede dejar de lado al factor  $n$  y que la función coseno se puede reemplazar por la función seno, por se en este caso muy aproximados en valores, las relaciones simples siguientes son resultado de las relaciones espectrales de las ecuaciones 6 á 8

$$S_d = \frac{1}{\omega d} \quad , \quad S_v = \frac{T}{2\pi} \quad , \quad S_v \quad (9)$$

$$S_a = \omega d S_v = \frac{2\pi}{T} \quad , \quad S_v \quad (10)$$

En el caso de amortiguamiento igual a cero, la aproximación que es producida por el reemplazo del seno por el coseno y este hecho introduce error no significativo, tal como se puede observar en el gráfico excepto en los posibles períodos largos. Como la cantidad de amortiguamiento incrementa un progresivo incremento el error puede ser detectado. Para estructuras típicas esas aproximaciones son generalmente aceptables y se puede escribir expresiones más convenientes y precisas para las cantidades de espectro tales como:

$$PSv \approx W_n Sd \quad (11)$$

$$Sa \approx W_n PSv = W_n^2 Sd \quad (12)$$

El valor  $PSv$  es determinado generalmente de un analizador analógico de espectro, y como tal representa la pseudo velocidad relativa máxima, y es por ello por que se emplea en el diseño del espectro básico.

La máxima fuerza sísmica desarrollada en el sistema de un simple grado de libertad, graficado en el Fig. 12 como resultado de un movimiento sísmico dada, se puede obtener directamente del espectro de velocidad de ese sismo. Es útil expresar lo dicho en relación con la ingeniería, empleando la estructura de un edificio de un piso particular, mostrado esquemáticamente en la Fig. 13 como la semejanza estructural del sistema idealizado en la Fig. 12.

Para este caso, la fuerza lateral o fuerza de corte,  $H$ , ejercida por las columnas sobre la masa y sobre el terreno es dada por

$$H = K Xr$$

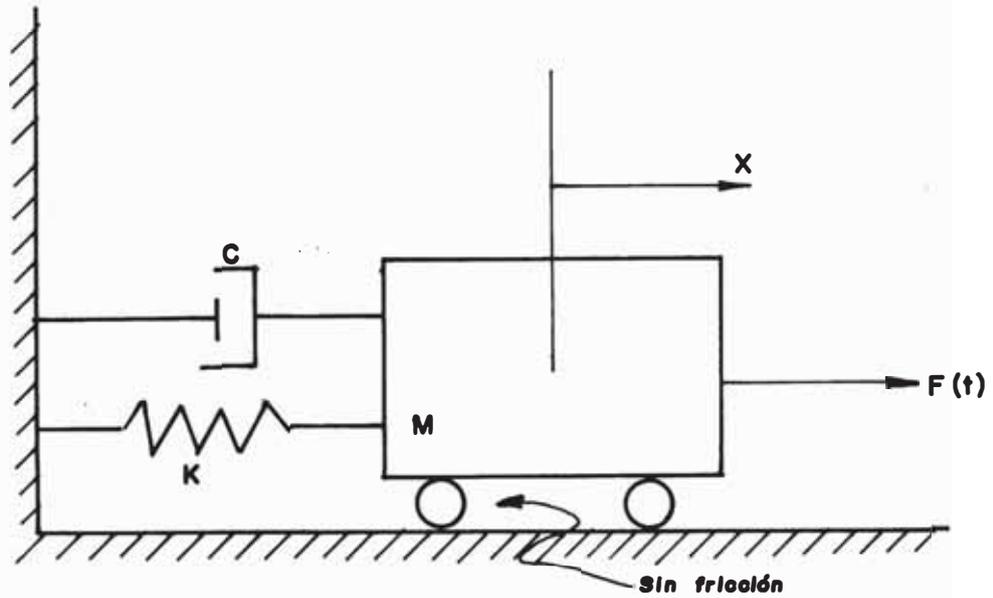


FIG. 12 SISTEMA IDEALIZADO DE UN GRADO DE LIBERTAD

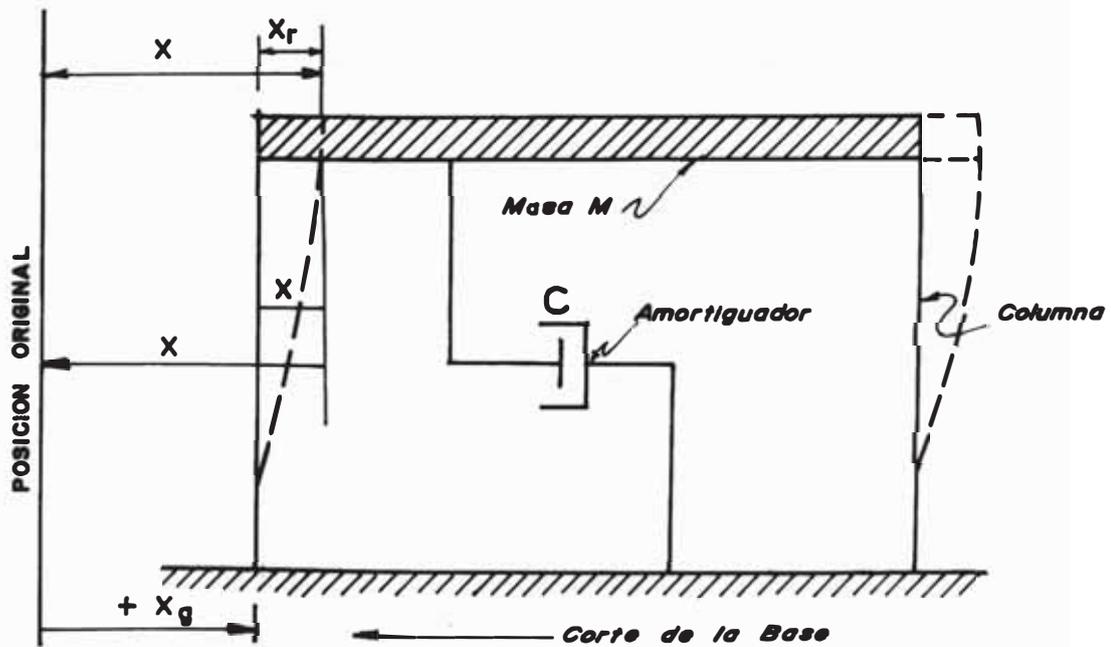


FIG. 13 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE DE UN PISO

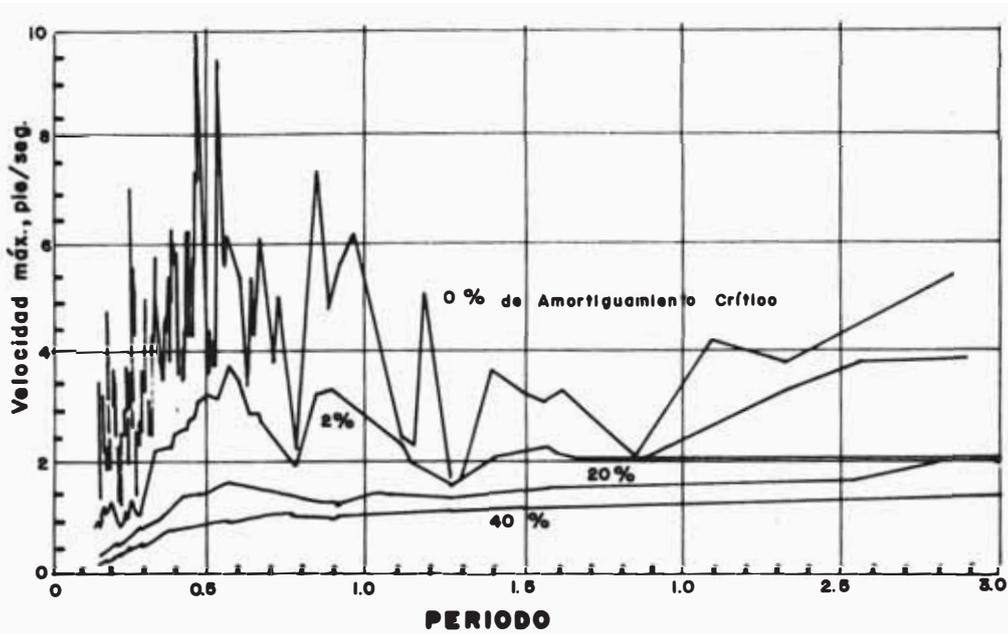


FIG. 14 Espectros de Velocidad para el Sismo de El Centro, California del 18 de Mayo de 1,940  
Campamento U-8

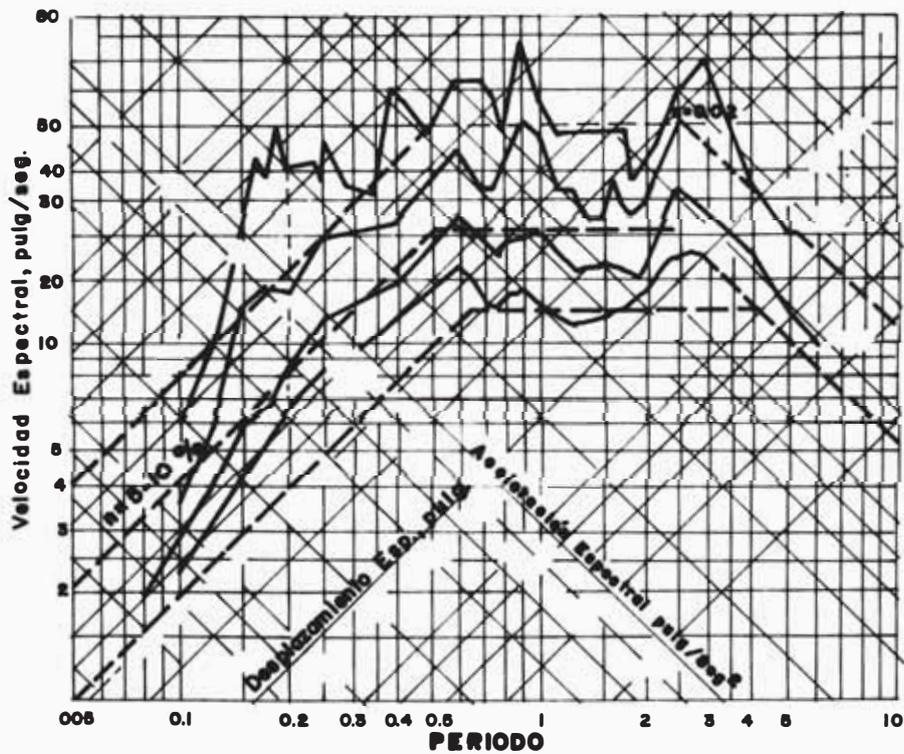


FIG. 15 Espectro de Respuesta del Sismo de 1,940 de El Centro

donde K es la rigidez de corte de las columnas. Entonces, cuando el espectro de velocidad es conocido, el corte máximo de la base,  $H_B$ , transmitido a través de la estructura desde el terreno, el que es igual a la fuerza sísmica desarrollada en las columnas, puede ser escrito directamente como:

$$H = K X_r \max = K S d \cong K \left( \frac{T}{2\pi} S_v \right)$$

$$H = K S d \cong \left( \frac{2\pi}{T} \frac{S_v}{g} \right) W \cong \frac{(S_a)}{g} W$$

$$H \cong (S_a/g) W$$

$$H = C_o W$$

donde  $C_o = S_a/g$

W expresa el peso de la estructura y g la aceleración de la gravedad,  $C_o$ , conocido como el coeficiente sísmico básico, es fundamentalmente un valor obtenido del espectro de aceleración y representa un diagrama del coeficiente de corte de la base como una función del período. La envolvente del espectro de aceleración es muy aproximado y semejante al diagrama C-T (Coeficiente Sísmico-Período) del Código Sísmico de California.

## C A P I T U L O    I I I

---

### COEFICIENTE SISMICO

#### 3.1. IMPORTANCIA

Los códigos de construcción requieren para las especificaciones del cálculo de las fuerzas sísmicas, que actúan sobre las estructuras, el empleo de un coeficiente sísmico  $C$ . La fuerza de diseño -- sísmico de una estructura sería igual al producto-- del coeficiente sísmico por el peso de las cargas permanentes más una parte de las cargas vivas de la estructura, sujetas a la acción sísmica.

El objetivo principal de los requerimientos en la determinación de las fuerzas sísmicas que actúan sobre una estructura, es que esta última no sufra el azar de los movimientos sísmicos.

Algunas fallas de estructuras pueden ser subsanadas,

pero éstas no sufrir ningún grave deterioro, que tienen una significativa probabilidad de ocurrencia, durante la vida de la estructura, las vibraciones pueden estar en el rango elástico con amplitudes no destructivas, pero durante fuertes sismos, los elementos estructurales pueden padecer esfuerzos plásticos y tener algunas rajaduras.

Los actuales criterios en la determinación del coeficiente sísmico están basados en las siguientes consideraciones: la probabilidad de ocurrencia de los sismos; las características del terreno; la naturaleza de las deformaciones estructurales; el comportamiento de los materiales de los edificios cuando están sujetos al tránsito de los esfuerzos oscilatorios; la naturaleza de las destrucciones en los edificios que puedan ser subsanadas, y el costo de reparación de las rajaduras comparado con el costo de proveer resistencia adicional a los edificios para que no sufran ninguna clase de rajadura.

El fenómeno mecánico de la acción de los movimientos sísmicos no ha sido rigurosamente establecido.

do, no se puede introducir una forma matemática que pueda ser aceptada por todos los países. Estos emplean criterios diferentes para la determinación de los coeficientes sísmicos.

El cálculo de las fuerzas sísmicas en edificios son estudiados bajo dos métodos: el estático y el dinámico. (Beles e Ifrin 1960) .

El método estático deja de lado las características elásticas de la estructura, considerando sobre el eje vertical una variación lineal del coeficiente sísmico. El método dinámico considera las propiedades estático-dinámicas de las estructuras por considerar un coeficiente sísmico que varía a lo largo de la estructura y depende de las características elásticas de las estructuras .

El método dinámico ha sido desarrollado a través de los últimos años por las escuelas norteamericanas, japonesas y soviéticas.

La escuela norteamericana estudia la respuesta dinámica de las estructuras elásticas, reduciéndolas a un sistema equivalente de una masa de un grado de liber-

tad. La influencia de los sismos es introducida en la forma de un espectro sísmico, cuya variación es basada en un cálculo correspondiente de las aceleraciones registradas durante sismos reales. El código japonés de 1955 estima fuerzas sísmicas, tomando en cuenta las características elásticas de las estructuras, el tipo y el grado de amortiguamiento, la naturaleza del suelo de cimentación y el grado de sismicidad de la región dentro de la cual la estructura está situada. La escuela soviética considera estructura como sistemas elásticos de  $n$  grados de libertad correspondiente al número de pisos, y la influencia sísmica es asimilada por una expresión analítica del movimiento impresa en la cimentación. La fuerza sísmica es calculada directamente en el nivel de cada piso. Mientras que las recomendaciones norteamericanas considera una variación lineal del primer modo vibracional, las prescripciones soviéticas distribuyen las cargas a lo largo de la altura de las estructuras sobre la base de las aceleraciones reales de un sistema elástico equivalente.

La aplicación de las fórmulas soviéticas de cálculo para fuerzas sísmicas parece ser más rigurosa desde

el punto de vista matemático, mientras que la fórmula norteamericana es más simple y más directa. Parece también que los efectos sísmicos por medio de análisis de espectros aprovecha mejor la realidad (Beles e Ifrim 1960).

### 3.2. FACTORES

En el diseño de la resistencia sísmica y el análisis del comportamiento estructural durante la actividad de fuertes sismos, intervienen una variedad de factores, siendo el factor determinante el relacionado con la resonancia sísmica, al cual se le conoce como el Coeficiente Sísmico Básico. Los factores condicionantes del Coeficiente Sísmico Básico son:

- (Ar) : Aceleración máxima de la roca base (Ar).
- (S) : Factor de amplificación dinámica del suelo
- (F) : Factor relacionado al diseño de la cimentación.
- (FSJ) : Factor de Interacción Cimentación-Estructura.
- (K) : Factor de Ductilidad

- (R) : Factor relacionado al amortiguamiento.
- (SR) : Factor de resonancia local.

El empleo de los factores condicionantes -  
varían en los diferentes países.

En algunos consideran ciertas factores condicionan-  
tes y en otros se utilizan diferentes factores.

Pero todos emplean el Coeficiente Sísmico-  
Básico, diferenciándose en la forma como lo determi-  
nan.

### 3.3. INFLUENCIA DE CADA UNO DE LOS FACTORES

#### COEFICIENTE SISMICO BASICO (Ç)

Es el factor determinante para el cálculo-  
del Coeficiente Sísmico de Diseño.

Está directamente relacionado con la aceleración del  
terreno durante el movimiento sísmico y está en fun-  
de los espectros de respuesta, tal como se ha indica-  
do en los capítulos anteriores.

ACELERACION MAXIMA DE LA ROCA BASE (Ar)

La aceleración máxima de la roca base es un parámetro que establece la intensidad sísmica del lugar y depende de las características del foco, de las propiedades del suelo y de la distancia del foco.

$$A_r = f ( S_0 , R_d , \Delta )$$

La actividad de un foco sísmico es debida a movimientos que se están produciendo en el interior de la tierra; el foco sísmico no es un punto aislado, sino que con ello se quiere indicar las zonas activas, cuyos orígenes pueden estar en la parte superior del manto y en la corteza terrestre, afectan a la subcorteza mediante grandes rupturas que producen ondas de choque, que son los medios por los cuales se propagan los efectos sísmicos.

Factor de Amplificación Dinámica del Lugar(S)

Este factor depende de la velocidad de la onda de corte,  $V_s$ , y la densidad de la roca de base.

Con resultados teóricos y experimentales (Wiggins, 1971), se ha demostrado que los efectos de las condiciones del lugar en intensidad sísmica será inversamente proporcional a  $(\rho V_s)^{1/2}$  (Wiggins 1971) menciona que Medvedev desarrolla una relación influenciada por el factor de amplificación dinámica del lugar para una serie de materiales de terreno, graduados desde granito a grano suelto. Sus relaciones empíricas para un número de muestras de suelos y roca, revelaron que S es inversamente proporcional a  $(\rho V_s)^{0.503}$ . El efecto del tipo de suelo sobre las destrucciones de las estructuras puede ser comprobados por cientos de experiencias. En general, es demostrado que las propiedades siguientes disminuyen a  $\rho$  y  $V_s$ , y de esa forma aumenta el factor de amplificación dinámica del lugar:

- Baja rigidez.
- Baja densidad.
- Alto nivel freático.
- Bajos esfuerzos de corte.
- Suelos frescos.
- Gran profundidad del lecho rocoso.

Wiggins(1971) menciona que Smoots en base a estudios experimentales concluye que los valores de S para diferentes tipos de suelos son los siguientes:

<u>Tipos de Suelo</u>	<u>S</u>
Rígido	1
Medio	2
Blando	4

#### Factor concerniente a la Cimentación (F)

El Código Francés considera el factor del diseño de la cimentación para determinar el coeficiente sísmico; varía de 0.8 á 1.3 .

Wiggins(1971) discutió la posibilidad de considerar este factor, y especialmente su relación a la profundidad de la cimentación.

Mientras más profunda sea la cimentación, menor va a ser este valor, porque generalmente, a mayor profundidad del suelo éste es más rígido y el valor de  $V_s$  es mayor.

#### Interacción Suelo-Estructura(FSI)

Este factor tiene mayor probabilidad de ocurrir en los suelos blandos que en los suelos duros. Sin embargo, los estudios de Housner, Blume y Jennings y Kuroiwa, mencionados en Wiggins(1971),-- sugieren que este factor no tiene influencia para la ciudad de California.

Factor de Resonancia Local(SR)

Este factor es considerado en relación con el período predominante. Wiggins menciona que Kanai considera que cada lugar posee un período predominante. Wiggins (1971) menciona que el factor de resonancia local es función del período predominante. Titaru y Cismigiu(1960) menciona que los valores del período predominante están en función del tipo de suelo, y dan los siguientes valores:

<u>Tipo de Suelo</u>	<u>Período Predominante</u>
Muy duro	0.155
Duro	0.1- 0.25
Firme	0.2 -0.45
Blando	0.3- 0.65
Muy Blando	0.6- 1.20

### Factor de Ductilidad (K)

Este factor describe la cantidad de absorción de energía que pueda ser observada como ductilidad participante en el sistema de respuesta. Cada estructura tiene su propio período de respuesta natural, así como una campana tiene su propia frecuencia natural de inclinación. Wiggins (1971). El concepto de movimiento perpetuo no existe en la vida real, porque la energía es siempre absorbida por -- "gomas" internas del sistema de vibración durante la acción sísmica. Si la ductilidad es encontrada en los elementos críticos desplazados por las fuerzas en una estructura durante la acción sísmica, la energía vibratoria del sismo puede ser absorbida. El factor de ductilidad en algunos tipos de estructuras puede bajar la intensidad de un sismo y en otros puede aumentarla. Este factor depende de  $\mu$  la relación entre el esfuerzo experimentado por un miembro el que es experimentado sólo bajo acción elástica.

Wiggins(1971) menciona que un grupo de investigadores tales como Newmark, Veletsos, han de--

terminado que los materiales ductiles pueden ser usados en los diseños de estructuras resistentes sísmicamente en orden a prevenir colapsos. Si bien muchos investigadores ha estudiado los efectos de varios valores de  $\mu$  en relación a la respuesta de sistemas de un grado de libertad y de múltiples grados por un factor  $K$ , sólo Blume (1961) refiere algunos valores para  $\mu$ .

El Código de Edificaciones de EE.UU. establece implícitamente el valor de 2. (Wiggins, 1971, cita a Nuvmark) quien establece un factor mínimo de alrededor de 4 á 6 para estructura ordinarias.

La propiedad seleccionada de  $\mu$ , puede ser empleada en la derivación de  $K$ , dependiendo de la capacidad total de una estructura descrita como  $\mu$  y el número de ciclos  $N$ , que la estructura pueda soportar durante el sismo, es determinado por el tipo de material a usar, mientras que el número de ciclos  $N$  es determinado primeramente por la magnitud sísmica más larga, teniendo un gran número de ciclos. Wiggins (1968) ha desarrollado una ecuación para el valor de  $K = 1/\mu$ .

### Amortiguamiento. (R)

La importancia del amortiguamiento como factor influyente en la resistencia estructural, durante movimientos sísmicos, ha sido reconocida por todos los investigadores en Ingeniería Sismológica. El amortiguamiento no es una simple propiedad a discutir, dado que es una función, no sólo del tipo de material a emplear en los elementos más importantes de la estructura, sino también del comportamiento-compuesto del total de la estructura. Por ejemplo, la interacción entre materiales de paredes, tabiquería, y los elementos más importantes de la armadura pueden generar varios grados de frotamiento durante la acción sísmica (Wiggins, 1971).

El tamaño del factor de amortiguamiento es también influenciado por la magnitud de las cargas aplicadas al elemento estructural. Wiggins (1971) cita que Watanabe fundamentó que bajo pequeñas vibraciones, el factor de amortiguamiento relativo puede variar de dos a tres por ciento del amortiguamiento crítico; bajo vibraciones grandes pue-

de variar de cinco a sesis por ciento. También menciona que Hudson determinó que para fuerzas típicas sísmicas variará entre cuatro y cinco por ciento. Wiggins (1968) investigó la relación entre R y  $\beta$ .

$$R = 5/\beta^{1/2}$$

donde B es el porcentaje del amortiguamiento crítico. El recomienda emplear el valor de cinco por ciento para  $\beta$ .

El Código Rumano establece que los valores promedio de  $\beta$  a ser considerados son:

acero	2.....6%
Concreto y concreto armado	7.....14%
Mampostería	15.....25%
Estructuras de Madera	10.....20%

C A P I T U L O     I V

---

4.1. Se busca obtener el Coeficiente Sísmico Básico de Lima.

4.2.-Se analiza el sismo del 17 de Octubre de 1966.

-Se ha empleado un acelerógrafo instalado en la cuadra 7 de la Av. Arequipa.

-El acelerógrafo así obtenido se ha digitizado.

-Con la computadora de la UNI se han obtenido resultados de aceleración, velocidad, desplazamiento, desplazamiento relativo, velocidad relativa, aceleración absoluta, Densidad Espectral de Energía etc, en función del período y del amortiguamiento; con los cuales se consiguen los Espectros de Respuesta de Desplazamiento, Espectros de Respuesta-

-de velocidad, Espectros de Aceleración--  
Absoluta y el Espectro de Pseudo Velocidad.  
dad.

La envolvente del Espectro de Aceleración  
Absoluta de la suma de los dos componentes horizontales con 5% de amortiguamiento es la curva que determina el Coeficiente Sísmico Básico de Lima.

C A P I T U L O        V

---

COEFICIENTE SISMICO DE RUMANIA

En este país, los sismos son registrados-- de tiempo en tiempo ellos llegan a los grados 8...9 en la escala Mercalli-Cancani-Sieberg. Sismos más - severos son raros; tienen un hipocentro constante - localizado en la parte externa de la curvatura de - las montañas Carpathian a una profundidad cercana a los 100... 200 kms. La preparación de la especificaciones de diseño estructural asísmico adolece de un problema difícil de resolver porque los métodos de diseño y especialmente los valores de los parámetros de diseño no pueden ser rigurosamente establecidos. El punto de vista que se empleó fue utilizar las indicaciones necesarias de la ingeniería sobre la práctica de los diseños, en función a resolver con la - máxima eficiencia los casos de la práctica usual; tales indicaciones están basadas en conocimientos mo--

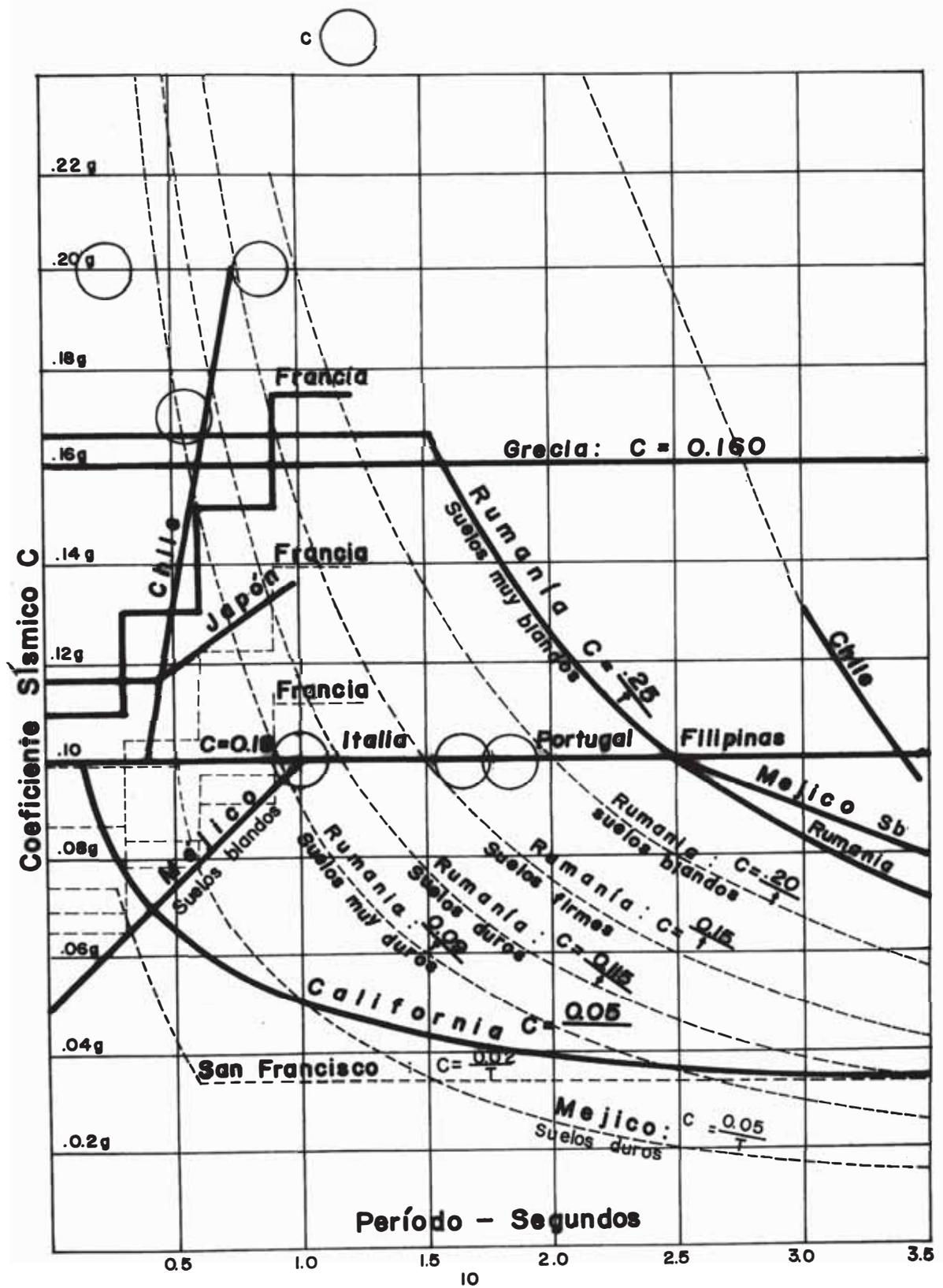


FIG. 17  
 COMPARACION DE COEFICIENTES SISMICOS DE  
 DIFERENTES PAISES

dermos de logros teóricos, también como sobre las - ' reglas de diseño concretadas por la experiencia existente en la construcción y comportamiento de estructuras asísmicas.

En orden a determinar las fuerzas sísmicas, se adoptó la teoría de los "espectros de respuesta" porque ella es la más fundamentada teórica y experimentalmente (Titara y Cismigiu 1960).

La ecuación adoptada para la determinación de la fuerza de corte aplicada en la base es:

$$Q_B = K \cdot \mathcal{T} \cdot \psi \cdot E \cdot P = \alpha \psi E P = c P$$

El parámetro K establece la intensidad sísmica del lugar y depende de las características del foco, en las propiedades del suelo y en la distancia del foco.

El parámetro  $\mathcal{T}$  son valores averiguados en proporción directa al espectro de aceleración  $S_a$ , considerando que este factor expresa la interacción suelo-estructura.

El parámetro  $\psi$  introduce el efecto de amortiguamiento interno en la estructura.

El parámetro  $\xi$  es un factor por el cual el sistema con muchos grados de libertad es hecho equivalente a un sistema de un grado de libertad.

P es la resultante de las cargas permanentes de gravedad y las cargas vivas actuando sobre la estructura sobre el nivel desde la cual existen deformaciones bajo acción de cargas sísmicas.

#### Establecimiento del factor K.

En la actualidad ha venido a aclarar que la escala de Mercalli y sus alternativas variadas propuestas no pueden servir como una base para una escala ingenieril de fuerzas. El establecimiento de una escala para Rumanía ha demandado una apreciación de una escala internacional de intensidades sísmicas, correspondientes a 4 zonas:

Zona I : Peligro de destrucciones moderadas  
en edificios construídos sin crite-

rios sísmicos.

Zona II: Peligro de importante destrucciones.

Zona III: Peligro de muy importante destrucciones.

Zona: IV: Peligro de extremadamente muy graves destrucciones.

El parámetro K es típico para la intensidad relativa de las zonas.

Esto fue aceptado que K, variaría de acuerdo a una suma geométrica.

Los valores de K para las diferentes zonas son:

$$K_I = 1.00; K_{II} = 1.70; K_{III} = 2.90; K_{IV} = 5.00$$

#### Determinación del parámetro $\eta$

Este parámetro es introducido en orden a establecer el espectro de respuesta correspondiente a varias condiciones de suelos, en el caso de un cierto valor de referencia del factor de amortigua-

miento "n". Se considera que existen resultados experimentales, también como el comportamiento de edificios en varias condiciones de suelo, corroborando la existencia de intervalos de variación de períodos predominantes, dependiendo de la rigidez de la tierra, también como la posibilidad de una apreciación técnica de esas condiciones en los valores de la aceleración.

Los terrenos serán clasificados en clases para que sean apreciados los siguientes valores de período predominante: suelos muy duros: 0.155, suelos duros : 0.1....0.25; suelos intermedios: 0.2....0.45; suelos blandos: 0.3....0.65; suelos muy blandos :- 0.6.....1.2 segs.

El objeto de la microzonificación es establecer las categorías de terrenos, dependiendo de la estratificación de capas superficiales.

Los rumanos consideran que el establecimiento de espectros de respuesta a ser introducidos en las especificaciones de diseño seguirían estos principios (Titaru y Cismigiu, 1960); la forma y los valores de los es-

pectros de respuestas resultarían como formas medias y valores medios de un gran número de registros directos de acelerogramas de varias categorías de terrenos, cuando se hace un programa de reconocimiento de zonificación espectral de un territorio. Para terrenos intermedios fue adoptada la forma media establecida por Housner para el sismo de California esas formas medias pueden ser reemplazadas satisfactoriamente por intervalos de 0.1....0.5 seg. por una línea recta y en intervalos de 0.5....3.0 por una hipérbola equilátera.

Para la cuatro categorías de terreno remarcadas, el espectro de respuesta fué delineado empíricamente, siempre teniendo en cuenta la forma general del espectro de terreno medio, y el comportamiento de los períodos de edificios. Las formas de esos espectros fue considerada válida para las cuatro zonas de intensidad sísmica. Es considerado como un factor constante, los períodos predominantes del terreno son considerados constantes, el factor variable viene a ser la aceleración del terreno, el cual se encuentra incluido en el parámetro K.

Establecimiento del parámetro  $\psi$

La influencia del amortiguamiento interno no fue introducido por un sistema de curvas espectrales  $S_a$ , diferenciando con el factor "n", Pero un parámetro independiente fue propuesto. Este parámetro es definido como una relación las ordenadas de dos curvas espectrales ( $S_v$  y  $S_a$ ) para dos valores diferentes del factor "n", correspondiendo al mismo período T.

$$\psi = \frac{2.32}{\sqrt[3]{n}}$$

Esta fórmula fue planteada, considerando que el factor "n" no depende de los modos de vibración.

COEFICIENTE SISMICO EN FRANCIA

El código de construcción antisísmica elaborado por la comisión que presidió M. Caquot y está

publicado bajo el título de "Reglas Relativas para Construcciones de Edificios dentro de las Regiones sujetas a sismos"(Rothé 1960) , contiene los puntos de vista que emplean los franceses en la determinación del Coeficiente Sísmico.

Una forma de calcular para cálculos estático, equivalente a hacer intervenir una fuerza horizontal de intensidad igual a  $\gamma_x W$  es el peso de las cargas permanentes, sujetas a la acción sísmica.. es el coeficiente sísmico para la dirección  $Ox$ .

El coeficiente está deducido de la teoría -- de las Respuestas Elásticas de las Estructuras sometidas a un movimiento sísmico; para el cálculo práctico  $\gamma_x$  es igual al producto de cuatro factores:

- $\alpha$  = Coeficiente de intensidad sísmica
- $\beta$  = Coeficiente de Respuesta
- $\eta$  = Coeficiente de distribución.
- $\delta$  = Coeficiente relativo a las cimentaciones.

El coeficiente  $\alpha$  especialmente interesa a los

sismólogos, porque es un parámetro de ajuste de la resistencia de una construcción a la intensidad sísmica para procurar una protección a la colectividad. Este coeficiente depende de la intensidad nominal  $i_n$ . El valor  $\lambda = 1$  es un coeficiente de intensidad que representa nominalmente la protección de las construcciones contra la intensidad sísmica nominal de 8, esta es considerada como la intensidad de referencia. Dentro de las localidades consideradas como zonas de fuerte sismicidad, el coeficiente  $\lambda$  se considera como igual a 1.; dentro de las regiones donde las intensidades sísmicas 9 á 10 son susceptibles de producirse se considera  $\lambda$  igual a 2.; ó por el contrario dentro de las localidades consideradas dentro de las zonas de baja sismicidad igual a 0.5.

El coeficiente de respuesta puede ser escrito como:

$$\beta (t) = T (t) / g$$

$T(t)$  = igual a la aceleración del suelo

$g$  = igual a la aceleración de la gravedad.

$\beta$  = depende del período  $T$  del modo fundamental de vibración de la construcción dentro de la dirección

estudiada, depende del grado de amortiguamiento y de la naturaleza del suelo cimentación para construcciones tradicionales se puede emplear:

$$B = 0.065 / \sqrt{T}$$

El coeficiente  $\gamma$  no depende de las características de la estructura, del interior de estas estructuras el comportamiento de la masa de aquella es importante. Si  $M_r$  son las diferentes masas a un nivel  $r$  y  $A_r$  las elongaciones dentro del modo fundamental de vibración, tendremos:

$$\gamma_r = A_r \frac{\sum M_r A_r}{\sum M_r A_r^2}$$

Prácticamente, también se puede obtener el valor del coeficiente de distribución por medio de la fórmula

$$M_r = \frac{3r}{2n+1}$$

$n =$  # de pisos

$r =$  nivel de referencia.

El coeficiente  $\delta$  es un término correctivo que depende del terreno de la cimentación y de la naturaleza de la cimentación, varía de 0.8 á 1.3.

COEFICIENTE SISMICO EN LOS ESTADOS UNIDOS  
DE NORTEAMERICA

Los primeros reglamentos sísmicos señalaban que la fuerza sísmica lateral en cada piso o parte de un edificio o estructura, a emplearse en el cálculo del cortante total en la base, era igual a un -- cierto coeficiente sísmico C por el peso de ese piso o parte, basándose en las recomendaciones de Sano. El coeficiente sísmico era el mismo para cada piso de -- un edificio dado y variaban sólo con la ubicación. Por ejemplo, si C fuera igual a 0.08 y el edificio tuviera varios pisos, se aplicaba el 8% del peso a cada -- piso como una fuerza lateral en cada nivel. Así para la mayoría de los edificios, las fuerzas laterales -- consideradas en los cálculos de cortantes aumentaron sólo ligeramente a partir de los niveles de los pisos superiores hacia abajo debido a que muchos de los elementos pesados, tales como muros de relleno, losas de piso, escaleras, etc, no varían apreciablemente de -- piso a piso.

Las recomendaciones propuestas por la Asocia-

ción de Ingenieros Estructurales de California(SEAOC) se basaron en porciones de los siguientes reglamentos vigentes en el Estado de California:

- 1.- Uniform Code of the International Conference of Building Officials, adoptado en 1046.
- 2.- Reglamento del Comité Unido de San Francisco, Publicado en 1952.
- 3.- Reglamento de la ciudad de San Francisco, adoptado en 1954.
- 4.- Reglamento de la ciudad de Los Angeles, adoptado en 1957.

El coeficiente de cortante en la base, C, en porcentaje de la carga permanente W establecido por estos Reglamentos son los siguientes:

1.- Uniform Code             $c = \frac{60}{N + 4.5}$

donde N es el número de pisos sobre el piso considerado. Así para un edificio de un solo piso, N es 0

y C es 13.3%; para un edificio de 13 pisos N es 12 y C es 3.65%; para una estructura de 21 pisos, N es 20 y C es aproximadamente 2.5%, que es el coeficiente mínimo permitido.

2.- Reglamento del Comité Unido:

$$c = \frac{0.15}{T}$$

con un valor máximo de 0.06 y un mínimo de 0.02. Ya que este Reglamento emplea la carga permanente más un 25% de la sobrecarga, el coeficiente para la carga permanente varía entre 6.6% y 2.2%.

3.- Reglamento de la ciudad de San Francisco:

$$c = \frac{0.2}{T}$$

C varía entre 7.5% y 3.5%, basado en la carga muerta más un cierto porcentaje de sobrecarga; para permanente sólo, C varía entre 8.2% y 3.8%.

4.- Ciudad de los Angeles:

$$c = \frac{4.6 S}{N + 0.9(S-8)}$$

donde S es el número total de pisos y N es el número de pisos sobre el piso considerado. Para los primeros 13 pisos S tiene un valor de 13. Por tanto dentro de este rango se cumple la fórmula del Uniform Code.

La derivación de la fórmula para el cortante en la base se basó en estudios de los daños y la continua investigación sobre la respuesta espectral de resonadores, efectuada por diversos investigadores, destacando Alford, Martel y Housner. Se concluyó que el período de vibración de la estructura es un factor muy importante en la determinación del coeficiente sísmico, que las fórmulas que emplean el número de pisos como la principal variable como una medida del período no resultan adecuadas. En la elección de la fórmula para la determinación del período natural se consideraron como variables principales a las dimensiones del edificio.

Se concluyó igualmente, que la utilización de una sola fórmula para el cálculo del coeficiente C para todos los tipos estructurales, no tomaban en consideración en forma efectiva a la categorías completamente diferentes de construcción. Al considerar las diversas categorías, se recomendó un factor para modificar el coeficiente sísmico de acuerdo con la capacidad de absorción de energía y la ductilidad de la estructura. Igualmente existe una bonificación para estructuras con defensas escalonadas, En fin, se decidió el empleo de la siguiente fórmula:

$$V = K C W$$

donde K representa la influencia del comportamiento dinámico de los diferentes tipos de construcción con grados variables de amortiguamiento estructural, rigidez, ductilidad y absorción de energía.

Después de mucho estudio se aprueba la siguiente expresión para el cálculo del coeficiente sísmico:

$$.. \quad c = \frac{5}{\sqrt[3]{T}}$$

Con un valor máximo del 10% C está expresado en porcentaje.

Los valores de K se establecieron para cuatro tipos de estructuras sistemas de arriostamiento:

a)  $K = 1.0$ , se estableció para estructuras que poseen un "marco espacial para cargas verticales" diseñado para llevar la totalidad de las cargas verticales, muertas y vivas y con muros de rigidez u otros sistemas de arriostre que son diseñados para resistir todas las cargas laterales. El marco espacial para cargas verticales no llevará ningún porcentaje de cargas laterales; sin embargo, puede aprovecharse del marco para lograr una cierta restricción lateral.

b)  $K = 1.33$ , se estableció para las estructuras tipo cajón que no tienen un marco espacial para cargas verticales completo. Las cargas verticales y laterales pueden resistirse mediante diversas combinacio-

nes de muros portante, marco, muros de rigidez y sistemas de arriostre vertical.

Las estructuras tipo (a) y (b) están limitados a 13 pisos y no deberán exceder los 49 metros de altura. Los períodos para estas estructuras pueden calcularse por la fórmula recomendada por el SEAOC.

El Reglamento establece que para el cálculo de C, el valor de T no deberá ser menor de 0.10 segs. y el valor máximo de C para edificios de uno o dos pisos no excederá del 10%.

- c)  $K = 0.30$ , se estableció para una estructura que tiene un marco espacial capaz de resistir un mínimo del 25% del cortante total en la base, V. Aún cuando el marco sea capaz de resistir el 25% de las fuerzas laterales, deberá diseñarse el sistema completo para el 100% de V con todos los elementos resistentes participando de acuerdo al principio de las rigideces relativas. El 100% de la resistencia a fuerzas laterales puede tomarse con -

muros de rigidez, arriostramiento vertical, etc. Se juzgó que el 25% con capacidad en el marco, constituye una importante segunda línea de defensa en el caso de un sismo excepcionalmente intenso.

- d)  $K = 0.67$  se estableció para estructuras en las cuales la fuerza lateral total  $V$ , es resistida en forma íntegra por el marco que se diseña con la suficiente ductilidad. En este sistema de entramado, puede emplearse como valor del período de vibración.

$$T = 0.10_x N$$

siempre que el marco no esté restringido por elementos más rígidos que evitarían que el marco tomara la totalidad de las fuerzas laterales.-- Cuando se diseñen estructuras altas y esbeltas bajo esta categoría, es esencial prestar especial consideración al control de las deflexiones laterales de un piso respecto a los pisos adyacentes.

Los valores de K de los párrafos (c) y (d) se aplican a estructuras de cualquier altura que tienen un marco espacial. Sin embargo, debe -- notarse que para estructuras de más de 13 pisos o 49 metros de altura, es obligatorio un marco de tipo. Se requiere que el marco esté constituido por un material dúctil o una combinación dúctil de materiales.

Al establecer los coeficientes sísmicos, el Comité consideró entre otros aspectos, las - condiciones geológicas en regiones sísmicas, los suelos en los cuales se cimentan las estructuras, el balanceo o asentamiento de la cimentación y la influencia de la distancia al epicentro con respecto a los diversos tipos de estructuras.

#### DISEÑO SISMICO EN EL JAPON

A fines del siglo XIX, en la zona central-

del Japón ocurrió un gran sismo, conocido como el - sismo de Nobi de 1891. Tokio fue destruído por otro sismo en 1894. Como resultado de estos sismos fue un mayor estudio de los factores que influyen en la -- resistencia antisísmica. Parecía que la aceleración del terreno era el factor principal. Aunque no se - dispuso inmediatamente de normas escritas, se formo un criterio de diseño, especialmente por los ingenie- ros jóvenes. El sismo ocurrido en 1906 en la ciudad- de San Francisco, originó una aceleración en el desa- rrollo de la cuantificación de las fuerzas sísmicas. El Dr. Sano fue uno de estos ingenieros jóvenes y - prontamente anunció que se podía lograr una estructu- ra antisísmica, diseñando para una fuerza lateral pro- porcional al peso de la estructura. El coeficiente de proporcionalidad podía expresarse en la siguiente fór- ma:

$$K = \frac{\alpha}{g}$$

expresión en la cual  $\alpha$  es la aceleración sísmica - supuesta y  $g$ , la aceleración de la gravedad. Para a- plicar este concepto a una estructura de varios pisos,

el peso se podía suponer concentrado en cada nivel de piso y multiplicarse por el factor K para conseguir la fuerza lateral de diseño. Este valor "K" - fue llamado coeficiente sísmico. El empleo de este factor es sólo posible, si el calculista asume, de acuerdo a su criterio, su propio valor numérico. El valor resultaría teóricamente uniforme en valor a lo largo de la altura del edificio, si ésta fuera muy rígida, pero no sería uniforme para estructuras más flexible. Sano publicó su principio de diseño sísmico una década antes del catastrófico sismo de la ciudad de Kanto en 1923. Después del Dr. Sano, Tachū Naito desarrolló un método de diseño sísmico, -- basándose en los principios de Sano. Su más importante concepción fué un método de análisis de marcos con tableros de muro mediante un "coeficiente de distribución de las fuerzas laterales", Este concepto se basa esencialmente en la igualdad de las deformaciones suponiendo losas de piso infinitamente rígidas. Como consecuencia del sismo de Kanto en 1923, se adoptó un reglamento nacional de construcciones. Para el

coeficiente K se dió un valor de 0.1 para las estructuras ordinarias y 0.15 para las estructuras de tipo estaca(chimeneas, torres, etc), combinados con bajos esfuerzos admisibles( $1190 \text{ kg/cm}^2$  para el acero y otros valores disminuídos) sin ninguna especificación para incrementos admisibles en los esfuerzos por combinación de esfuerzos resultante de cargas verticales y laterales. En los años siguientes se incrementaron estos esfuerzos unitarios (el acero tenía  $1400 \text{ kg/cm}^2$ ) debido al mejoramiento de la calidad y las propiedades de los materiales.

El Reglamento de 1924 permaneció prácticamente inalterado hasta la publicación del Japanese-Engineering Standard, en 1948; que fue aprobado en 1950. Se especificó un valor del coeficiente sísmico de 0.2; los esfuerzos admisibles para cargas sísmicas de corta duración se incrementaron al doble de los valores especificados en 1924. Para materiales sin flujo plástico se especificó como esfuerzo admisible bajo cargas rápidas, el esfuerzo de fluencia. Para materiales con flujo plástico, se tomó el valor de dos

veces el permitido para cargas de larga duración.

El criterio básico del JES- 3001 fué, en lo que concierne a las especificaciones sísmicas ,que una estructura construída cumpliendo las recomendaciones del reglamento no resistiría un sismo sin daño, sino que sufriría daños que podrían repararse en un costo no mayor que el 10% del soto original de la construcción.

Después de la publicación del JES-3001, éste no suplantó legalmente las especificaciones del Reglamento de Construcción de 1924. Todas las comisiones de Construcción, sin embargo, exigían el cumplimiento de dichas especificaciones. En los años de postguerra se diseñaron y construyeron muchos edificios altos y esbeltos en el Japón. Al tomar en cuenta el valor duplicado del coeficiente sísmico, los calculistas hallaron dificultades para contrarrestar las fuerzas de tracción en la cimentación de las columnas debidas al momento de volteo. La principal discrepancia radicaba en que la gran fuerza de tracción tenía por

origen los valores duplicados de K, que no era contrarrestado por el empleo de esfuerzos admisibles duplicados. Se argumentó que este problema no ocurriría si se empleaban las especificaciones del Reglamento de 1924. Después de muchas discusiones en el Instituto de Arquitectura, se concluyó que los valores efectivos del coeficiente sísmico no se modificaría, el efecto de la flexibilidad se consideró en la forma de un incremento gradual en el valor del coeficiente sísmico, a partir de una cierta altura. Se confirmó también que se podía emplear el valor del Reglamento de 1924 (K igual a 0.1), pero con los valores del esfuerzo unitario admisible del mismo.

Basado en el artículo preparado por la asociación de Ingenieros Estructurales de San Francisco, se ha desarrollado un método para determinar dinámicamente el valor efectivo del coeficiente sísmico. Paralelamente a este trabajo, se efectuó estudios estadísticos de probabilidad de sismos destructivos en las distintas regiones del Japón. Igualmente se es-

tudió la relación de la condición del subsuelo con los daños sísmicos. Para considerar estos factores se propuso la modificación de la ley de Construcción es de 1954.

La modificación considera los siguientes puntos:

1.- Coeficientes Sísmicos básicos para edificios

---

Altura sobre el terreno, en m	Factor Sísmico básico, $K_0$
Hasta 16	0.20
16 - 20	0.21
20 - 24	0.22
24 - 28	0.23
28 - 31	0.24

---

Esta tabla está representada por la fórmula:

expresión en la cual  $H$ , es la altura sobre el nivel del terreno en metros.

2. Modificación de K en función del tipo de construcción y de las condiciones del suelo (coeficiente):

Terreno	Concreto			
	Madera	ACero	Armadado	Albañilería
Terciario (formaciones antiguas y firmes)-	0.3	0.6	0.8	1.0
Conglomerado (mantos de poca potencia con grava).	0.3	0.8	0.9	1.0
Aluvial (formaciones blandas y recientes)	1.0	1.0	1.0	1.0
Suelos muy blandos y saturados	1.5	1.0	1.0	1.0

3. Modificación del factor K<sub>o</sub> en función de la regionalización sísmica (coeficiente):

Región	
Kanto, Chubu, Kinki, que incluyen las ciudades de Tokyo, Yokohama, Kyoto, Osaka y Nagoya.	1.0
Región del Noreste, y la región central, la Isla de Shikoku y el sur de Hokkaido.	0.9
Kyushu y el norte de Hokkaido	0.3

El coeficiente sísmico de diseño K se determinará de la siguiente fórmula:

$$K = K_0 \cdot n_1 \cdot n_2$$

COEFICIENTE SISMICO EN LA UNION SOVIETICA

Hasta 1940 la edificación en zonas sísmicas era regulada en algunas regiones por especificaciones publicadas con carácter local. Recién en ese año se adoptó por primera vez una "Instrucción para el diseño de construcciones civiles e industriales erigidas en zonas sísmicas" que fue empleada con carácter nacional. En 1943 fue revisada y sufrió ligeras modificaciones para las condiciones de la época de la guerra y fue empleada en esta forma hasta 1948 en que fue reemplazada por las "Especificaciones para el Diseño de Edificios y Estructuras en Zonas Sísmicas". En 1951 se publicaron las "Normas aplicables a la edificación en regiones sísmicas" que fue el primer reglamento con carácter obligatorio empleado en todas las regiones sísmicas de la URSS. Finalmente en 1957 se adoptaron las nuevas "Normas y Reglamentos para la Edificación en Regiones Sísmicas" que difiere esencialmente de todos los documentos normativos anteriores, y consta de nueve secciones.

En este reglamento se desarrolla un nuevo método dinámico que difiere esencialmente del llama-

do método estático de diseño que fue utilizado en los albores del diseño sísmico. La práctica introdujo enmendadas en este método de diseño incluyendo el factor de corrección. El valor de diseño de la fuerza sísmica se determinaba mediante la fórmula:

$$S = \alpha K_c Q$$

donde:  $\alpha$  es un cierto valor de corrección.

$K_c$  el coeficiente sísmico.

$Q$ , el peso de un elemento de la construcción ubicado a un cierto nivel en el edificio o estructura.

La insuficiencia de esta aproximación al diseño de estructuras para las fuerzas sísmicas es universalmente reconocida. En la URSS la primera proposición para la transición del método estático de diseño bajo la acción de una base en movimiento fue hecha por K.S. Zavriev y A.G. Nazarov en 1931. Ellos idealizaron el movimiento del terreno como una combinación de movimientos armónicos simples.

Esta proposición no condujo a resultados prácticos de manera que se continuó utilizando el método estático.

En 1948, el Instituto Central de Investigación Científica de Estructuras, empezó la tarea de mejorar el método de diseño sísmico. La consideración de las oscilaciones de un sistema elástico - con n grados de libertad bajo la acción de una base que se mueve horizontalmente muestra que posteriormente llamaremos fuerzas sísmicas y que pueden expresarse de la manera siguiente:

$$S_k = \sum_1^n S_{ki} = \sum_1^n K_c \beta_{it} \eta_{ki} \alpha_k$$

donde  $S_k$  = fuerza en el punto k con la deflexión del sistema en la dirección principal 1.

$K_c$  = coeficiente que determina la relación entre la aceleración del terreno y la aceleración de la gravedad (g), es decir los valores que determinan la intensidad sísmica de la región.

$\beta_{it}$  = Coeficiente, que determina el efecto dinámico de la acción del desplazamiento de -

la base en el sistema en consideración en cada dirección principal  $i$  en cualquier instante  $t$

$n_{ki}$  - coeficiente para tomar en cuenta la influencia de la forma deformada del sistema en la dirección  $i$ , es igual a:

$$\eta_{ki} = \frac{X_i(X_k) \sum_1^n Q_j X_i(X_j)}{\sum_1^n Q_j X_i^2(X_j)}$$

$X_i(X_k)$  y  $X_i(X_j)$  = deformación del sistema en sus vibraciones libres en la dirección principal  $i$  en el punto  $k$  y todos los puntos,  $j$ , es decir en los puntos correspondientes a la ubicación de cargas en el esquema adoptado de diseño de una estructura.

$Q_k$  y  $K_j$  pesos de las masas en el punto  $K$  y todos los puntos  $j$  del sistema.

$n$  = número de grado de libertad del sistema.

$g$  = aceleración de la gravedad.

La expresión de las fuerzas sísmicas muestra que el

valor de  $S_k$  presenta la suma de series de sumandos  $S_{ki}$ ; por lo tanto, es natural que el diseño que tome en cuenta todos los sumandos de la **serie** será el más perfecto. Sin embargo es necesario recordar que los factores varían con el tiempo, por lo que la determinación de  $S_k$  como una suma de series es muy complicada y completamente impráctica.

El análisis detallado de los sismogramas muestra que, generalmente los sismos empiezan con procesos oscilatorios de alta frecuencia, que son similar a la acción impulsiva, y luego pasa a oscilaciones de frecuencia cada vez menor. Las influencias de estos procesos oscilatorios sobre sistemas con diversas características dinámicas serán como se sabe, variadas. El efecto dinámico del impulso. A la **inversa**, la deformación máxima en sistemas que poseen bajas frecuencias corresponderá a la acción de la parte remanente del sismograma y empezarán posteriormente, sólo después de repetida la acción oscilatoria de la base. Tomando en cuenta este hecho deberá notarse que los valores máximos de los sumandos individuales de las series, es decir **las fuerzas**  $S_{ki}$  de iner-

cia de acuerdo con las diversas formas de oscilaciones libres, poseyendo en esencia diferentes frecuencias se suceden mutuamente en el tiempo. Las fuerzas sísmicas correspondientes a una alta frecuencia de la estructura aparecen y alcanzan su máximo valor en el momento que las oscilaciones correspondientes a una baja frecuencia de la estructura no se ha desarrollado aún. Cuando éstas alcancen su valor máximo, las anteriores serán ya insignificantes o habrán sido completamente amortiguadas. Teniendo esto en consideración se decidió que para los propósitos prácticos era más expeditivo considerar separadamente todos los posibles valores máximos de las fuerzas en cada dirección principal ( $S_{ji}$ ) y diseñar la estructura para la más desfavorable de todas las combinaciones. En este caso, desaparece la necesidad de determinar la variable del tiempo y solo su valor máximo presenta interés práctico.

#### COEFICIENTE SISMICO EN EL PERU

Para las estructuras de los edificios, la mí-

nima fuerza horizontal en la base que se tendrá en cuenta en el análisis, se calculará de acuerdo a la fórmula siguiente:

$$H = UKCP$$

donde: H = fuerza horizontal en la base

U = coeficiente que esta en función de la regionalización sísmica y el empleo de la edificación.

K = factor de modificación, en el que se tiene en cuenta la respuesta de una estructura una excitación sísmica de acuerdo a su capacidad de absorción de energía.

C = coeficiente que determina el porcentaje de la carga permanente más una parte de la carga viva que debe tomarse como constante en la base.

P = carga permanente total del edificio más un porcentaje de la carga viva.

Coeficiente U

Condiciones regionales de sismicidad:

Región 1.- Comprende los departamentos de Arequipa, Moquegua, Tacna y la parte sur de los departamentos de Ica y Ayacucho.

Región 2.- Comprende toda la Costa, la Sierra y la Ceja de Selva, exceptuando la parte indicada en la Región 1. También se considera en esta Región, parte de la Selva Central.

Región 3.- Comprende la región selvática, exceptuando la parte central, incluida ya en la Región 2.

#### Uso de la Edificación

Las construcciones atendiendo a su uso, serán clasificadas según los siguientes **tipos**:

- A. Construcciones rurales y vivienda populares hasta de dos pisos.

- B. Construcciones comunes.- Constituidas por edificios de oficinas, edificios de departamentos, casas residenciales, etc.
- C. Edificios Públicos.- Constituidos por edificios donde se producen grandes aglomeraciones de personas (teatros, cenes, estadios, coliseos, colegios, etc), por edificios que contienen servicios públicos vitales (centrales eléctricas, centrales telefónicas, plantas de abastecimiento de agua, Bombas contra incendios, asistencias públicas, etc) y por edificios donde sus ocupantes están bajo condiciones especiales (hospitales, sanatorios, cárceles etc).
- D. Construcciones especiales.- Se consideran como construcciones especiales, desde el punto de vista sísmico, aquellas que al fallar total o parcialmente, presentan además del peligro propio del colapso o semicolapso y un peligro adicional; como hornos, calderas, grandes depósitos inflamables, que podrían producir un gran incen-

dio; reactores atómicos, que podrían producir irradiaciones, etc.

Este tipo de construcción debe ubicarse de tal manera que no entrañe peligro para el área urbana en caso que falle por causa de un sismo.

El estudio de la resistencia sísmica de la estructura de este tipo, incluyendo la explicación del criterio que se ha seguido para determinar el coeficiente sísmico, debe ser objeto de un informe especial de parte del Ingeniero responsable del diseño y cálculo estructural.

#### Coeficiente K

Es un factor de modificación, en el que se tiene en cuenta la respuesta de una estructura a una excitación sísmica de acuerdo a su capacidad de absorción de energía.

Se entiende por ductibilidad a la relación que existe entre la deformación que tiene la estructura cuando

está en el límite del colapso a la deformación de la misma cuando empieza a fluir.

Los tipos de estructuración y los coeficientes K -- respectivos, son los siguientes:

Tipo P .-  $K = 1.33$ .- Para edificios con estructuras "tipo cajón" en los que se considera que las cargas verticales y horizontales se toman con muros de corete, cajas de ascensores y otros elementos rígidos.

Tipo Q.-  $K = 1.00$  Para edificios que no estén específicamente detallados en esta relación.

Tipo R.-  $K = 0.80$ . Para edificios cuyos pórticos dúctiles se diseñan para resistir por lo menos el 25% del cortante en la base del edificio. Los pórticos deben ser capaces de tomar el 25% de la fuerza horizontal total cuando se consideran que actúan independientemente y el 100% debe ser soportado por todos los elementos resistentes, haciéndose la distribución de acuerdo al método de las rigideces relativas. Los elementos resistentes están constituidos por muros de --

corte, cajas de ascensores, arriostramientos verticales o por varias combinaciones de elementos verticales que resisten la fuerza lateral.

Tipo S.  $K = 0.67$  Para estructuras en que las fuerzas horizontales totales son resistidas por pórticos dúctiles, sin que elementos rigidizantes impidan su libre vibración.

#### Coeficiente C.

Este factor determina el porcentaje de la carga permanente más una parte de la carga viva que debe tomarse como cortante en la base y está expresado por la siguiente fórmula:

Lateral está formado solamente por pórticos, muros de

$$C = 0.05 / \sqrt[3]{T}$$

El período de vibración fundamental T, se determina-

rá en función de las características estructurales y de distribución de masas de la edificación o, en su defecto se podrán emplear las siguientes fórmulas:

I Para edificios donde los elementos resistentes a la fuerza lateral están formados solamente por pórticos, muros de corte de la caja de ascensores sin que paredes exteriores ni interiores rigidicen la estructura:

$$T = 0.09 h / \sqrt{D}$$

II Para edificios con pocos muros de corte, grandes ventanas y pocos muros de relleno de ladrillos:

$$T = 0.07 h / \sqrt{D}$$

III Para edificios con gran cantidad de muros de corte, gran cantidad de muros y tabiques divisorios y ventanales pequeños en la dirección que se está estudiando:

$$T = 0.05 h / \sqrt{D}$$

IV Los períodos de vibración de edificios con estructuración tipo "S" pueden ser calculados con la fórmula:

$$T = 0.1 \eta$$

## C O N C L U S I O N E S

- El criterio empleado en los países sísmicos para considerar en sus Códigos Sísmicos, el efecto --- destructor de los terremotos, ha sido evaluar las tensiones que el sismo produce en los diversos elementos de la estructura y comprobar si esas tensiones son menores que las necesarias para producir la ruptura.
  
- En general los coeficientes sísmicos se han basado más en la experiencia que han dejado los terremotos destructores que en el análisis del fenómeno vibratorio que ellos representan.  
En este trabajo empleamos el análisis espectral de los sismos para determinar el coeficiente sísmico-básico.
  
- El análisis espectral revela en forma directa los aspectos del movimiento sísmico del terreno que -- son de principal interés del ingeniero estructural y la preparación de las curvas de espectros de --

respuesta es una de las principales utilidades de los registros de los acelerogramas de sismos.

- Las aceleraciones registradas del terreno y los espectros de respuesta de los sismos producidos, proveen una sólida base para el diseño racional de las estructuras, de tal forma que soporten a los efectos destructores de los sismos.
- Se debe observar que un espectro de respuesta calculado no es lo mismo que un espectro de diseño especificado.
- Se debe observar que un espectro de respuesta calculado no es lo mismo que un espectro de diseño especificado.
- El espectro de respuesta es una forma conveniente de describir un movimiento sísmico particular, mediante el gráfico, en un sistema de coordenadas de la velocidad máxima de respuesta, aceleración máxima de respuesta o el desplazamiento máximo de

respuesta de un oscilador, y este valor es un valor instantáneo que puede no ser detectado durante el sismo. Por ejemplo, no se puede considerar como la **aceleración del terreno a un pico de aceleración**, por ejemplo, del 35%, pero que se encuentra aislado mientras los picos predominantes son del orden, digamos, del 10%.

- Por ejemplo, el sismo registrado en Lima, el 17 de Octubre de 1966, es analizado en este trabajo. Si **bien la aceleración máxima fué 33%**, el área de este pulso de aceleración no fué grande, y por lo tanto, el espectro de respuesta de velocidad no fue especialmente grande. La aceleración relativamente alta, sólo produjo moderadas destrucciones en la ciudad de Lima, que confirma la idea de que **la máxima aceleración por si sola, no es una medida satisfactoria de la severidad de un sismo.**

La experiencia científica, respecto al análisis--  
espectral de los sismos, indica que para suelos -  
diferentes se obtienen espectros de respuesta di-

ferentes.

- Desde el punto de vista del análisis espectral, en todo Reglamento Sísmico se deben considerar los diferentes suelos observamos que en el Reglamento Sísmico Peruano, a pesar de que la fórmula principal es fórmula espectral, no consideraría los diferentes suelos, por lo tanto sugerimos de que se consideren los diferentes suelos.
- El amortiguamiento es un factor muy importante en el análisis elástico de las estructuras sujetas a los efectos de los sismos, tal como se observa en las curvas espectrales presentadas.
- Los espectros de respuesta con mayor porcentaje de amortiguamiento crítico, nos indican de que las estructuras diseñadas con bajos amortiguamientos están expuestas a sufrir daños. Sugerimos que se diseñen las estructuras, considerando el mayor amortiguamiento posible.
- El análisis espectral tiene todavía fuentes de in-

certidumbre, tales como:

- Se asume el dato de entrada del espectro
  - No existe forma de considerar el efecto de la duración del sismo.
  - Pequeñas inexactitudes en la estimación de la rigidez y del amortiguamiento de la estructura tiene considerable efecto sobre las fuerzas.
- El trabajo presentado tiene la limitación de que sólo hace el análisis espectral de un lugar, durante el sismo del 17 de Octubre de 1966. Un estudio más completo exige un mayor número de registros de acelerógrafos para diferentes sismos. Recomendamos que se aumente el número de acelerógrafos en las principales ciudades del país.

\*

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

Housner, G.W. (1970) "Strong Ground Motion" in -  
Wiegel R.L., coordinating editor, "Earthquake -  
Engineering" Prentice Hall, Englewood Cliffs N.J.,  
1970.

Houdson, D.E.(1970) "Ground Motion Measurements in  
R.L., coordinating Editor, "Earthquake Engineering".  
Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1970.

Huaco, D 1963 "Zonas de Fracturas y Regionalización  
Sísmica del Perú" Primeras Jornadas Chilenas de Sis-  
mología e Ingeniería Antisísmica. Chile, 1970.

Huaco,D. (1972) "Criterios para el Catálogo Sísmico  
de Sudamérica" CERESIS, 1972.

Duda, S (1972) "On the recurrence relations of earth-  
quakes (Acta Geofísica de Polonia Vol. XX).

Neuman, F "Principios Fundamentales para la interpre-  
tación de Sismogramas" CERESIS, 1970.

Bonilla M.G. "Surface Faulting and Reteted Effects" in Wiegel R.L., coordinating editor "Earthquake - Engineering". Prentice Hall, Englewood Cliff N.J. 1970.

Byerly,P (1933) "The Records of Earthquakes at --- Intermediate and Great Distances" in "Seismology"- Bulletin of the National Research Council, 1933.

Brady, A.G. (1966) "Studies of Responses to Earthquake Ground Motion". Pasadena: Earthquake Engineering Research, Laboratory. California Institute Of Technology.

Beckwith, T.G. and N.L. Buck (1961) Mechanical Measurement, Reading: Addison- Wesley.

Bullen,K.E. (1963),"Introduction to the Theory of - Seismology, 1963.

Beles, A.A. and Ifrims M. 1960. "Engineering Aspects of Earthquake in Rumania in the Light of Modern Investigations" SWCEE Tokyo 1960.

Brinder, R.W. and Wheler W.T. "Building Code Provisions for Aseismic Desing SWCEE Tokyo, 1960.

Bikhovsky V, Goldemblot J. and Korchynsky. "Desings of Earthquake Proof Building Structures in the USSP" SECEE, Tokyo, 1960.

Duflon, P.C.J. and R.I. Skinner (1965) New Strong - Motion Acelerographs. Proceedings of the Third World Conference on Earthquake Engineering, New Zeland.

Heck, N.H. H.E. McComb, and F.P. (1936)  
"Strong-Motion Program and Tilmeters" Earthquake -- Investigations in California 1934-35, Sepecial Publ. No. 201 Washington, D.C. U.S. Departament of Commerce, Coast Geodesic Survey.

Numeta Masanore "Earthquake-Resistant Desing for Civil Engeneering Structures Earth Structures and --- Foundations in Japan". SWCEE Tokyo 1966.

Otsuki Inki "Desing Seismic Forces for Reinforced Concrete Buildings". SWCEE Tokyo 1960

Rothe J.P. "Le risqueséismique et la recherche d'une protection contre les séismes". Science Progrées. La Natura No. 3341, 1963.

Ritcher, Ch F. "Elementary Seismology" (1958)

Sanhueza, P "Instalación de una Red de Acelerógrafos en Chile" 1969.

Newman, F. "Principios Fundamentales para la Interpretación de Sismógramas" CERESIS , 1970.

Titorn E and A. Cismigin. "On the Rumanian General Desig Specifications for Civil and Industrial Building in Seismic Areas" SWCEE Tokyo, 1960.

Takahosi, R (1956) The SMAC Strong Motion Accelerograph and other Lates Instruments for Measuring Earthquake and Building Vibrations, Proceedings of the Conference on Earthquake Engineering, Berkeley.

Udías, A. (1971) "Introducción a la Sismología y Estructura Interna de la Tierra" 1971.

Wiggins J.H. and Moron D.F. 1971 "Earthquake Safety  
in the City of Long Beach Based on **the** Concept of -  
Balanced Risk".

\*