

# CARACTERISTICAS DE TERREMOTOS. ANALISIS GENERAL

Raúl HUSID L.\*

## RESUMEN

*En el presente trabajo se exponen las operaciones desarrolladas para poder analizar los acelerogramas de terremotos y se presentan las consideraciones teóricas básicas necesarias para el estudio de las características de los temblores, más importantes para el ingeniero.*

*Se propone un criterio simple para decidir la duración mínima del acelerograma, de modo que los espectros de respuesta correspondientes no resulten sensiblemente diferentes a los que se obtendrían con el registro completo.*

## INTRODUCCION

Cuando ocurre un terremoto, experimentan sus efectos los seres humanos, construcciones, naturaleza, etc. La mayor parte de las escalas de intensidad sísmica se basan en la observación de dichos efectos y resultan, en la práctica, altamente subjetivas.

El ingeniero necesita conocer suficientes características del movimiento del suelo durante un terremoto si pretende llevar a cabo un análisis realista del comportamiento de estructuras sometidas a temblores.

Los acelerógrafos permiten obtener los acelerogramas, o sea, los registros de la aceleración del suelo en función del tiempo para tres direcciones normales. El análisis de los acelerogramas generalmente requiere de su digitalización, de correcciones por escala de tiempo, por escala de aceleración, por posición del eje de aceleración nula, etc.

---

\*Profesor de Dinámica Avanzada y Jefe de la Sección Ingeniería Antisísmica del Departamento de Geofísica, Sismología y Geodesia de la Universidad de Chile. Profesor de Ingeniería Antisísmica, Universidad F. Santa María, Valparaíso.

Conocido el movimiento del suelo, basta conocer la respuesta de la estructura de un grado de libertad, para poder determinar la respuesta de estructuras lineales de varios grados de libertad sometidas al mismo terremoto.

A continuación se presentan las consideraciones tanto prácticas como teóricas necesarias para el desarrollo de este estudio.

## DESCRIPCION GENERAL DEL EQUIPO DE DIGITALIZACION

El equipo de digitalización Benson Lehner utilizado en este estudio está compuesto por dos unidades funcionales que son el Telecordex Tipo 282 E y el Datareducer 099 D.

### *Telecordex tipo 282 E*

El Telecordex proporciona un método eficiente para contabilizar y registrar datos empíricos obtenidos de movimientos lineales o angulares bidireccionales. Por ejemplo, trenes de pulsos, que representan información digital, con características propias, pueden ser contabilizados y almacenados para ser registrados por equipos externos tales como una máquina de escribir, perforadora de cinta y perforadora de tarjetas IBM.

El Telecordex consiste en un mueble que alberga cuatro unidades, unidad de control, tablero de control, contador y telepak, cada una de las cuales desempeña una función específica.

*Unidad de control.* La unidad de control contiene los circuitos de control de salida, el tablero de control y los conmutadores de las constantes. Los controles que se encuentran frente al panel permiten al operador suministrar la potencia eléctrica al instrumento, iniciar la secuencia de la salida, programar para una salida en serie, y seleccionar los datos que serán insertados en el registro de salida.

*Tablero de control.* La disposición de las conexiones de los cordones de acoplamiento en el tablero de control fija la secuencia de la salida en serie hacia la máquina de escribir, perforadora de cinta y a la unidad perforadora de tarjetas. El tablero de control está dividido en bloques, cada uno de los cuales cumple una función determinada.

*Contador.* El contador mostrará una cuenta corrida de las salidas registradas llevadas a cabo durante una secuencia de operaciones. El conmutador multiplicador permite que la cuenta avance en incrementos de cero a nueve unidades en cada salida.

*Telepak.* El telepak tiene, entre otras funciones, la acumulación de las señales de entrada al sistema.

El Telecordex utiliza dos acumuladores Telepak, físicamente idénticos. El conmutador eléctrico de los tubos contadores de uno de ellos se designa por X y por Y el del otro. Esta designación se hace con el objeto de identificar los ejes para los cuales el telepak está acumulando datos.

### *Datareducer 099 D*

Los registros de muchos experimentos son oscilogramas sobre los cuales una o más variables son trazadas gráficamente como función de otra, a menudo como función del tiempo. Para un análisis posterior, estos datos gráficos deben ser llevados a una forma más útil tal como tarjetas perforadas, cinta perforada, etc.

El datareducer es un instrumento de lectura destinado a convertir a una forma digital datos de registros de oscilogramas, ya sea, opacos o translúcidos.

Este instrumento consiste básicamente de un tablero luminoso, iluminado por el respaldo, de un sistema de medida provisto de un brazo que lleva un retículo deslizante, y de dispositivos para convertir las distintas posiciones del cursor en señales digitales de salida.

El brazo de medición lleva el cursor sobre un carro que puede ser movido verticalmente a lo largo de él para medir la traslación en la dirección Y. Por su parte, el brazo está apoyado en un carro que puede moverse horizontalmente a través del tablero para medir en la dirección X. Dos ruedas manuales situadas frente al instrumento, bajo el área de lectura, dan el movimiento de traslación en el sentido X e Y del retículo.

## METODO DE DIGITALIZACION

Los acelerogramas digitalizados para este trabajo fueron copias de los registros originales de la United States Coast and Geodetic Survey (U.S.C.G.S.). Para digitalizarlos se empleó el instrumento Datareducer 099 D, antes descrito, asimilando el acelerograma a una poligonal.

El método de digitalización usado consistió, en general, en la lectura de las ordenadas y abcisas de las puntas del registro. Pero, cuando el caso lo requería, se leían puntos intermedios con el objeto de obtener una representación del acelerograma lo más exacta posible.

Las lecturas de las ordenadas del registro corresponden a las de la línea central que recorre la banda del acelerograma.

### ***Precisión del instrumento de lectura***

La precisión del instrumento de lectura (Datareducer 099 D) está dada por una característica del aparato, y viene expresada por el hecho de que el desplazamiento de 1 cm del retículo, tanto en horizontal como en vertical, equivale a 78 unidades de máquina o cuentas.

En el caso particular de digitalización de acelerogramas, la precisión que se obtiene en la escala horizontal (unidades de tiempo) y vertical (unidades de aceleración) depende, respectivamente, de la escala de tiempo del registro y de la sensibilidad del acelerógrafo.

Designemos por  $L$  la longitud en cm correspondiente a los  $s$  segundos de la escala de tiempo del registro. Entonces la precisión en la escala horizontal queda dada por:

$$1 \text{ cuenta} = \frac{s}{78 \cdot L} \text{ (seg)}$$

En la escala vertical la precisión obtenida es:

$$1 \text{ cuenta} = \frac{1}{78 \cdot S} [g]$$

siendo:

$S$  = sensibilidad del acelerógrafo en cm/g.

$g$  = aceleración de gravedad.

Con el objeto de ilustrar cuantitativamente este aspecto, se ha escogido un acelerograma cuyas constantes son más o menos representativas del conjunto de que se dispone.

En estas condiciones, se tiene:

Escala horizontal: 1 cuenta = 0,0016 [seg]

Escala vertical : 1 cuenta = 0,0009 [g]

Ahora bien, para fines prácticos, se usan intervalos de digitalización no inferiores a 0.01 seg, lo cual demuestra que el Datareducer 099 D es un instrumento adecuado para los estudios realizados en el presente trabajo.

## **CORRECCIONES DEL ACELEROGRAMA DIGITALIZADO**

En la mayoría de los estudios relacionados con análisis de terremotos interesa conocer no sólo los espectros de respuesta, sino que, además, otras características del terremoto tales como el desplazamiento y la velocidad del suelo. Como consecuencia de ello, el acelerograma digitalizado debe ser sometido a

varias correcciones de manera que los resultados obtenidos tengan la mayor semejanza con los fenómenos observados<sup>1</sup>.

Las correcciones que generalmente se hacen son por escala de tiempo, por valores de lectura, por escala de aceleración y por posición del eje de aceleración nula.

**Corrección por escala de tiempo**

Consiste en la conversión a segundos de los tiempos, expresados en unidades de máquina, correspondientes a las ordenadas leídas en la digitalización. Para este efecto, se multiplica cada uno de éstos por un factor de escala que depende del método de digitalización y de la escala de tiempo del registro.

**Corrección por valores de lectura**

Mediante esta corrección las ordenadas del acelerograma se refieren a un eje que sea aproximadamente el eje de aceleración cero. Esto se hace restando a todas las aceleraciones un valor constante que, por comodidad, se toma igual al primer valor de la aceleración.

**Corrección por escala de aceleración**

Consiste en multiplicar las ordenadas del registro (hecha la corrección anterior) por un factor tal que exprese las aceleraciones en las unidades que se deseen. Este factor depende de la sensibilidad del instrumento y del procedimiento de digitalización.

**Corrección por determinación de la posición del eje de aceleración cero**

El método de determinación del eje de aceleración cero corresponde al desarrollado por G.V. Berg y G.W. Housner<sup>1,2</sup>. En él se supone que el registro tiene por eje de aceleración nula la línea de ecuación:

$$v = 3A_1 t^2 + 2 A_2 t + A_3 \tag{1}$$

expresada en el mismo sistema de coordenadas en que se ha corregido hasta aquí el registro. Los valores de las constantes  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  son tales que hacen mínimo el valor cuadrático medio de la velocidad del suelo.

Además, se supone que tanto la velocidad como el desplazamiento inicial del suelo son nulos.

De acuerdo con la ecuación 1, se obtienen las siguientes expresiones para la aceleración y velocidad integrada corregidas:

$$a_i = a_i^* - 3 A_1 t_i^2 - 2 A_2 t_i - A_3 \tag{2}$$

$$v_i = a_i^* t_i - A_1 t_i^3 - A_2 t_i^2 - A_3 t_i - A_4 \quad (3)$$

donde:

$a_i$  = aceleración corregida del punto  $i$

$a_i^*$  = aceleración del punto  $i$  sin corrección por posición del eje de aceleración cero.

$t_i$  = tiempo del punto  $i$

$v_i$  = velocidad corregida del punto  $i$

$A_4$  = constante de integración

Sea  $b = t_i - t_{i-1}$  un intervalo de tiempo tal que la aceleración del suelo es una función lineal del tiempo en dicho intervalo.

Entonces el desplazamiento corregido del suelo para el tiempo  $t_i$  será:

$$x_i = x_{i-1} + b v_{i-1} + \frac{b^2}{6} (2 a_{i-1} + a_i) \quad (4)$$

Iterando, en forma sucesiva, con las ecuaciones 2, 3 y 4, se determinan los distintos valores de la aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo durante el sismo.

## TEORIA DEL ESPECTRO DE RESPUESTA

El diseño antisísmico de estructuras exige el conocimiento de las fuerzas de inercia en los diferentes niveles, o bien, de las deformaciones experimentadas por la estructura durante un movimiento sísmico. Debido a que, en general, las diferentes estructuras no son completamente rígidas, las aceleraciones del suelo sufren una amplificación en la estructura, lo cual indica que para el cálculo de las fuerzas de inercia no basta conocer las características del movimiento sísmico, sino que es necesario determinar la respuesta dinámica de la estructura.

En el caso de estructuras lineales de varios pisos, que poseen modos normales de vibrar<sup>3,4</sup> la respuesta del sistema a un terremoto dado puede determinarse a base de la respuesta del sistema de un grado de libertad.<sup>5,6</sup>

El estudio exhaustivo de la respuesta de este sistema de un grado de libertad, para su aplicación en ingeniería sísmica, nos conduce directamente a la teoría del espectro de respuesta. Esta teoría fue iniciada por Benioff<sup>7</sup> y Biot<sup>8,9,10</sup> y desarrollada por Housner<sup>11,12,13</sup> y Hudson<sup>5,6,14</sup>, todos en el Califor-

nia Institute of Technology.

Actualmente, en la mayoría de las normas modernas de diseño antisísmico se ha introducido el espectro de respuesta para determinar las fuerzas laterales que ha de soportar una estructura.<sup>15,16</sup>

Para deducir las relaciones importantes que nos proporciona esta teoría, consideremos el esquema de la Fig. 1, en la cual se representa un sistema de un grado de libertad con una masa  $m$ , que desliza sobre una superficie horizontal, y que está ligada a una pared por un resorte lineal de constante  $k$  y por un amortiguador viscoso de constante  $c$ .<sup>17</sup>

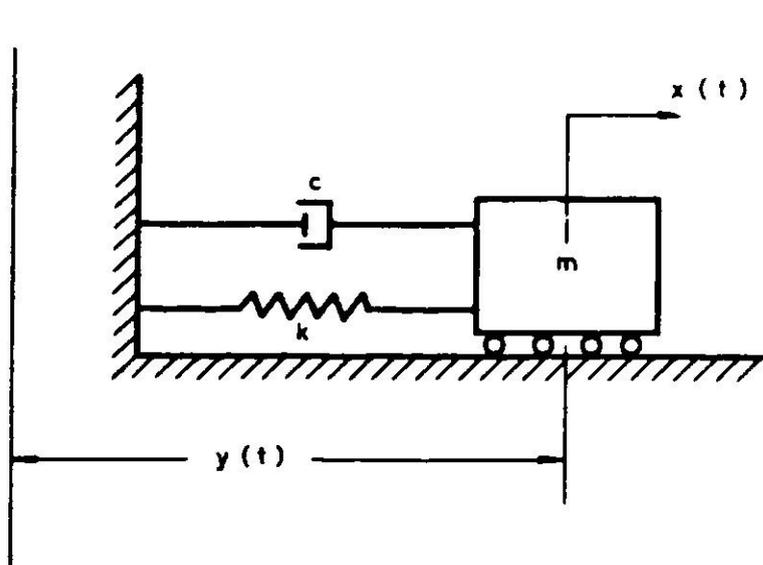


Fig. 1. Modelo de sistema de un grado de libertad.

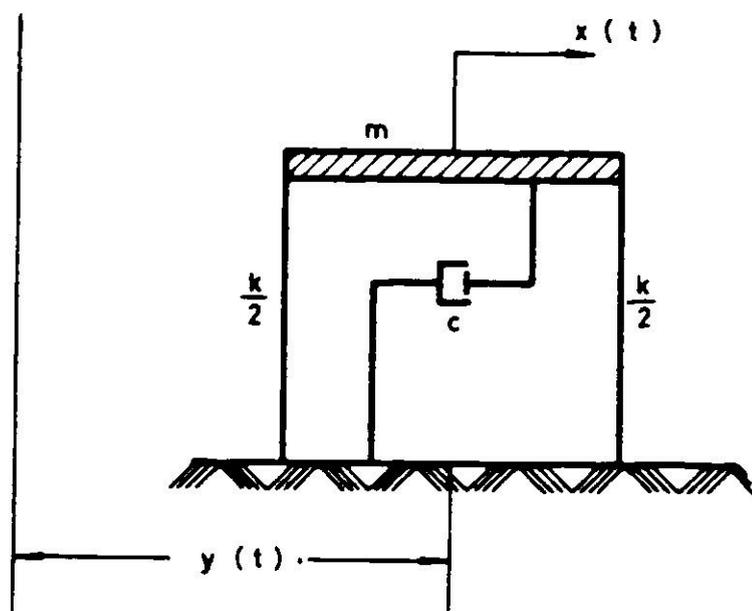


Fig. 2. Modelo de estructura de un piso.

Este modelo del sistema de un grado de libertad es completamente equivalente al de la Fig. 2, que representa una estructura de un piso, en el cual se hacen las siguientes hipótesis:

Viga de masa  $m$  infinitamente rígida soportada por columnas flexibles de rigidez  $k/2$ , desprovistas de masa.

Amortiguamiento viscoso.

Se desprecia la influencia de la gravedad en la respuesta, es decir, el descenso de la masa debido al movimiento lateral.

Se cumple la ley de Hooke.

En el análisis subsiguiente, la notación empleada es la que se indica:

$x$  : desplazamiento absoluto de la masa  $m$

$y$  : desplazamiento absoluto del suelo

$x - y$ : alargamiento del resorte

$\dot{x} - \dot{y}$ : velocidad relativa de la masa  $m$

$\ddot{x}$  : aceleración absoluta de la masa  $m$

La ecuación diferencial del movimiento, en ambos modelos, es, según la segunda ley de Newton:

$$m \ddot{x} = -k(x-y) - c(\dot{x}-\dot{y}) \quad (5)$$

estando  $x$  e  $y$  referidos a un sistema fijo.

Dividiendo la ecuación por  $m$  e introduciendo:

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

$$c_c = 2 m \omega$$

siendo  $\omega$  la frecuencia natural no amortiguada, y poniendo  $z = x-y$ , se obtiene:

$$\ddot{z} + 2 \frac{c}{c_c} \omega \dot{z} + \omega^2 z = -\ddot{y}(t) \quad (6)$$

Si consideramos que, para el instante inicial  $t = 0$ , el desplazamiento y la velocidad de la masa  $m$  son nulos,  $x(0) = 0$  y  $\dot{x}(0) = 0$ , entonces la solución de la ecuación homogénea resulta idénticamente nula.

En estas condiciones el desplazamiento relativo de la masa será:

$$z(t) = - \frac{1}{\omega \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2}} \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-\frac{c}{c_c} \omega(t-\tau)} \operatorname{sen} \omega \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2} (t-\tau) d\tau \quad (7)$$

Derivando la expresión de  $z(t)$  obtenemos la velocidad relativa:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) = & - \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-\frac{c}{c_c} \omega(t-\tau)} \cos \omega \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2} (t-\tau) d\tau + \\ & + \frac{\frac{c}{c_c}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2}} \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-\frac{c}{c_c} \omega(t-\tau)} \operatorname{sen} \omega \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2} (t-\tau) d\tau \end{aligned} \quad (8)$$

Derivando, nuevamente, se obtiene la aceleración absoluta:

$$\ddot{x}(t) = 2\omega \frac{c}{c_c} \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-\frac{c}{c_c} \omega(t-\tau)} \cos \omega \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2} (t-\tau) d\tau +$$

$$+ \frac{\omega \left[ 1 - 2 \left( \frac{c}{c_c} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 - \left( \frac{c}{c_c} \right)^2}} \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-\frac{c}{c_c} \omega(t-\tau)} \operatorname{sen} \omega \sqrt{1 - \left( \frac{c}{c_c} \right)^2} (t-\tau) d\tau \quad (9)$$

Se definen los espectros de respuesta de desplazamiento relativo, velocidad relativa y aceleración absoluta<sup>17</sup> como los máximos valores absolutos de las correspondientes expresiones antes escritas, para un terremoto dado y para un período y amortiguamiento dados de la estructura.

Se tiene así:

Espectro de desplazamiento relativo:  $S_d = |x-y|$  máx

Espectro de velocidad relativa :  $S_v = |\dot{x}-\dot{y}|$  máx

Espectro de aceleración absoluta :  $S_a = |\ddot{x}|$  máx

Llamando espectro de pseudovelocidad a la expresión:

$$S_{pv} = \left| \int_0^t y(\tau) e^{-\frac{c}{c_c} \omega(t-\tau)} \operatorname{sen} \omega \sqrt{1 - \left( \frac{c}{c_c} \right)^2} (t-\tau) d\tau \right|_{\text{máx}} \quad (10)$$

y considerando sólo valores pequeños del grado de amortiguamiento, se tienen las siguientes relaciones aproximadas:

$$S_{pv} \approx \omega S_d \quad (11)$$

$$S_a \approx \omega^2 S_d$$

Según Hudson<sup>6</sup> resulta que, siendo  $\ddot{y}(\tau)$  una función caótica, las funciones seno y coseno dan resultados prácticamente iguales cuando se avalúan los máximos de velocidad relativa. Entonces, manteniendo la condición de grado de amortiguamiento pequeño, se puede escribir:

$$S_v \approx S_{pv} \quad (12)$$

### Algunas aplicaciones del espectro de respuesta

Para estructuras complejas, que admiten modos normales de vibración, en las cuales se desea calcular la respuesta a un terremoto, el espectro de respuesta puede ser usado directamente para obtener una solución aproximada, basándose en el principio de superposición<sup>5</sup>.

A partir del espectro de respuesta pueden deducirse algunas conclusiones generales concernientes a la importancia relativa de los diferentes parámetros que intervienen en el problema sísmico. Quizás, el ejemplo más importante de esto es la contribución hecha por el espectro de respuesta para un mejor conocimiento de la influencia del amortiguamiento en la limitación de las sollicitaciones dinámicas de estructuras sometidas a un sismo.

La energía máxima de deformación acumulada en un oscilador de un grado de libertad queda, también, dada directamente por el análisis de los espectros de respuesta.

Se tiene que la energía máxima de deformación está dada por:

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} k (x-y)^2_{m\acute{a}x}$$

y evaluada por unidad de masa:

$$U_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \frac{k}{m} (x-y)^2_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \omega^2 S_d^2$$

## MEDIDA DE SEVERIDAD DE UN TERREMOTO

### *Introducción*

Un terremoto es considerado como un movimiento de la corteza terrestre originado por una repentina liberación de energía. Dicha liberación se produciría cuando las tensiones acumuladas en la corteza exceden la capacidad de resistencia de ésta.

La severidad de un terremoto depende de la cantidad de energía disipada durante el proceso de ruptura y del deslizamiento de partes del globo terrestre.<sup>22</sup>

La intensidad sísmica nos da una idea del grado de severidad del movimiento del suelo en el lugar considerado.

### *Escalas empíricas de intensidad sísmica*

Las primeras escalas empíricas de intensidad sísmica aparecen en Europa durante la segunda mitad del siglo XIX y constituyen un primer intento de cuantificación. Se basan en la apreciación de la destrucción o daños de las obras estructurales, objetos, suelo, reacción de las personas, animales, etc., al producirse el movimiento del suelo en la zona.

Basándose en lo anterior, Rossi y Forel (1883) establecieron una escala

de diez grados; y Mercalli (1902) una escala con doce grados. Posteriormente aparecen las escalas de más uso, la Mercalli Modificada (1931) de doce grados y la MSK (1964) de doce grados, que ha sido recomendada por la UNESCO.

Estas escalas son principalmente subjetivas, narrativas, cualitativas y no instrumentales.

Esta forma de medir la intensidad sísmica no tiene mucho significado por su poca exactitud, debido a que están afectadas por factores personales en mayor o menor grado y no definen propiamente una medida de intensidad, al no ser exactamente repetibles.

***Aceleración cuadrática media***

Algunos autores han utilizado en el pasado la aceleración máxima de un terremoto como una medida de la severidad de éste<sup>23,24</sup>, pero los resultados obtenidos demostraron que la aceleración máxima no es suficiente para estimar la capacidad de destrucción de un sismo. Se ha utilizado, frecuentemente<sup>24,25</sup> la aceleración cuadrática media, para la duración completa de un terremoto (para cada componente), como una medida de comparación al medir la severidad del terremoto. Aun cuando la idea es buena, resulta bastante sensible a la elección de la duración considerada del temblor.

Al estudiar la respuesta de estructuras simples que tienen la posibilidad de fluir, o cuando es de importancia conocer si la estructura sobrepasa una deformación máxima dada, antes del final del terremoto (duración elegida), se ha encontrado<sup>26,27</sup> que tiene gran importancia conocer cómo varía con el tiempo la aceleración cuadrática media (r.m.s. acceleration), y que, en muchos casos, sólo su consideración permite explicar algunos fenómenos que se presentan en el estudio de la respuesta de estructuras que pueden sufrir colapso<sup>25</sup>.

La aceleración cuadrática media de un terremoto está dada por:

$$\overline{a(t)} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t a^2(\tau) d\tau} \tag{13}$$

donde:

$\tau$  : variable temporal

$a(\tau)$  : aceleración del suelo durante el terremoto

$t$  : tiempo para el cual se evalúa la aceleración cuadrática media.

***Intensidad espectral propuesta por G.W. Housner***

Esta medida de intensidad sísmica se basa en el espectro de pseudovelocidades. Se define, para un grado de amortiguamiento dado, como el área encerrada bajo el gráfico del espectro de pseudovelocidades entre dos abscisas extremas:

$T = 0,10$  seg y  $T = 2,5$  seg. (Fig. 3)

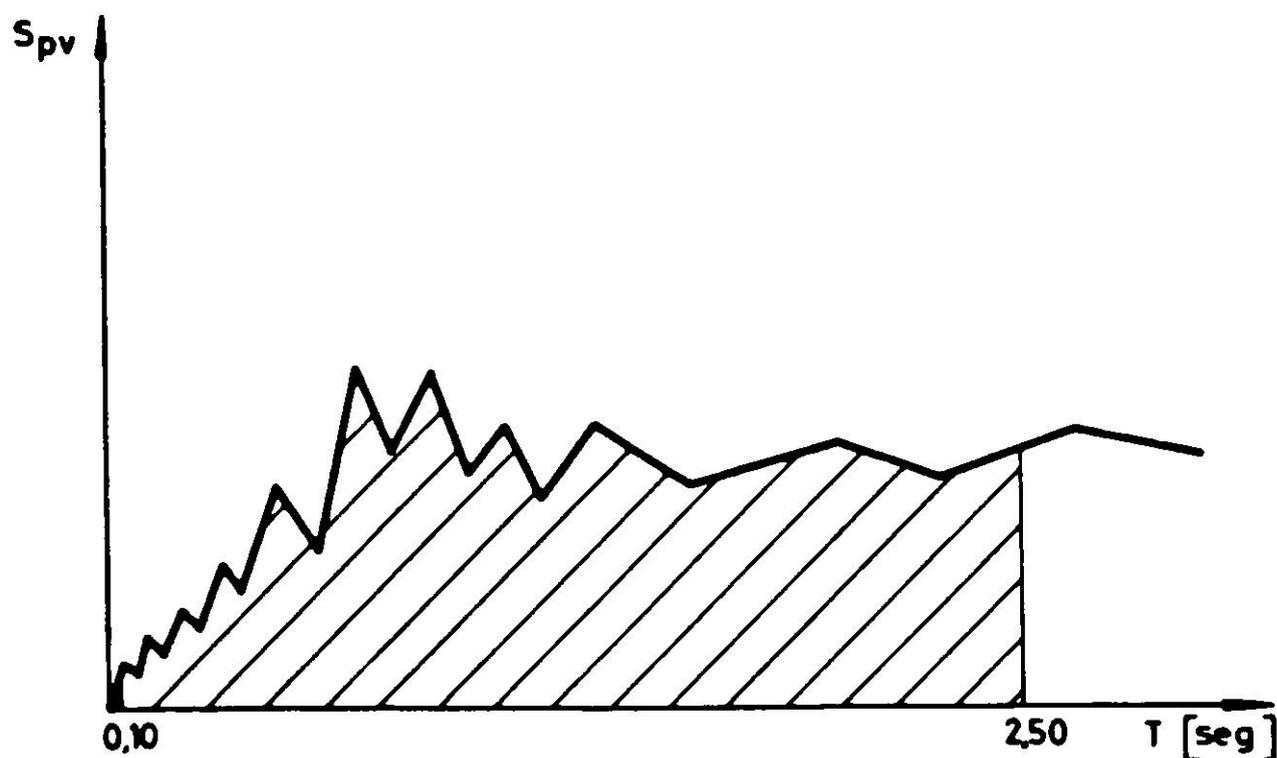


Fig. 3. Intensidad espectral de Housner.

La intensidad espectral de Housner  $I_H$  queda definida por la fórmula:

$$I_H = \int_{0,1}^{2,5} S_{pv} \left( \frac{c}{c_c}, \frac{2\pi}{T} \right) dT \quad (14)$$

donde:

$S_{pv}$  : valor de la ordenada del espectro de pseudovelocidades

$c/c_c$  : grado de amortiguamiento

$T$  : período no amortiguado de la estructura de un grado de libertad.

Esta integral representa un número real con dimensiones de longitud, que proporciona para cada componente de un temblor un valor único de la intensidad sísmica para cada grado de amortiguamiento.

La intensidad espectral de Housner mide la intensidad del sismo en una dirección dada, que es aquella en que se registró el acelerograma a partir del cual se calculó el espectro correspondiente.

Para justificar la elección de esta medida de intensidad sísmica a base del espectro de pseudovelocidades, Housner estima que una medida de intensidad apropiada debe estar relacionada con los máximos esfuerzos producidos por el sismo en las estructuras; en esta forma la intensidad es directamente proporcional a las tensiones producidas en una estructura.

Housner usa un modelo linealmente elástico, con amortiguamiento viscoso, de un grado de libertad, para representar las estructuras reales (Fig. 4).

El intervalo de integración lo justifica Housner<sup>12</sup> porque en una ciudad real existirán una gran cantidad de estructuras con períodos entre 0,10 seg y 2,50 seg, y se debe tener en cuenta este rango de períodos al definir la intensidad del sismo. La determinación del límite inferior de integración se debe a que, en las vecindades de  $T = 0$ , los espectros dejan de ser fidedignos, fundamentalmente por causas de tipo instrumental. En todo caso, el hecho de tomar  $T = 0,10$  en vez de  $T = 0$ , como límite inferior, tiene pequeña influencia en la variación del valor de la intensidad. La fijación del límite superior es arbitraria, debido a que los valores del espectro para períodos mayores que 2,5 seg son cantidades considerables, por lo que un aumento de este límite representa una modificación en la intensidad.

Como  $S_{pv}$  depende del grado de amortiguamiento, es imprescindible precisar el valor de  $c/c_c$  para determinar el espectro de pseudovelocidades. Para Housner<sup>12</sup> un amortiguamiento de un 20% del crítico es acaso el más significativo de la destructividad de un terremoto.

Como  $S_{pv}$  depende del grado de amortiguamiento, es imprescindible precisar el valor de  $c/c_c$  para determinar el espectro de pseudovelocidades. Para Housner<sup>12</sup> un amortiguamiento de un 20% del crítico es acaso el más significativo de la destructividad de un terremoto.

Todos los edificios tienen amortiguamiento y en los edificios corrientes, que no han sido particularmente diseñados para resistir esfuerzos sísmicos, se pueden esperar valores del amortiguamiento relativamente altos.

Los valores de los espectros varían considerablemente para  $c/c_c$  pequeños, por lo que la elección de este valor afectará notablemente el valor de la intensidad espectral. Por esta razón, la intensidad de Housner no es una medida rigurosamente cuantitativa.

El concepto de intensidad de Housner está relacionado con las tensiones máximas que se producen en la estructura y no con la destructividad potencial del sismo, idea en que se basan las escalas empíricas; además, no toma en cuenta el probable comportamiento plástico de la estructura, que se supone linealmente elástica con amortiguamiento viscoso, ni considera la influencia de la duración del terremoto. Por último, no se justifica elegir el espectro de pseudovelocidades, pudiéndose también utilizar el espectro de desplazamiento o de aceleración, ya que ellos están aproximadamente relacionados.

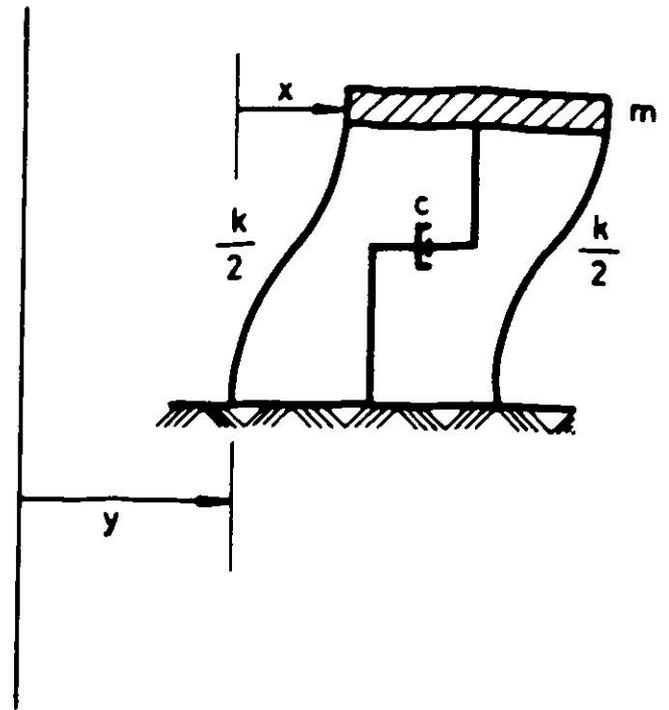


Fig. 4. Modelo de Housner.

**Intensidad propuesta por Arturo Arias**

Arias define la intensidad<sup>28</sup> como la cantidad de energía por unidad de peso

disipada por una familia de osciladores de un grado de libertad, cuyas frecuencias están comprendidas en el rango  $(0, +\infty)$ , para un terremoto y amortiguamiento dados.

$$I_A = \frac{1}{g} \frac{\arccos c/c_c}{\sqrt{1-(c/c_c)^2}} \int_0^{t_0} a^2(\tau) d\tau \quad (15)$$

donde:

$c/c_c$  : grado de amortiguamiento viscoso

$\tau$  : variable temporal

$g$  : aceleración de gravedad

$a(\tau)$  : aceleración del suelo durante el terremoto

$t_0$  : duración total del terremoto

La expresión de la intensidad de Arias considera como modelo estructural el oscilador lineal simple con amortiguamiento viscoso, y no depende de la frecuencia propia de la estructura.

La influencia del grado de amortiguamiento sobre el valor de la función

$$\frac{\arccos c/c_c}{\sqrt{1-(c/c_c)^2}}$$

es pequeña dentro del rango de valores que toma el parámetro  $c/c_c$  en las estructuras de la práctica. En consecuencia, la definición puede normalizarse eligiendo  $c/c_c = 0$ , con lo cual:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a^2(\tau) d\tau \quad (16)$$

El valor de  $t_0$  es de difícil elección, ya que en los acelerogramas reales no es posible saber con exactitud la duración de la parte principal del terremoto y es necesario elegir en forma arbitraria la zona del registro que se considerará.

Nótese que tanto la medida de intensidad definida como la aceleración cuadrática media dependen, ambas, de la integral:

$$\int_0^t a^2(\tau) d\tau$$

y de ahí que puedan esperarse resultados análogos al utilizarlas.

**Intensidad sísmica definida a base del daño acumulado en una estructura elastoplástica simple con amortiguamiento viscoso**

La energía disipada por un modelo lineal simple con amortiguamiento viscoso no representa, en forma rigurosa, una medida de los daños producidos en la estructura. Estos daños están relacionados con la energía disipada por histéresis.

Para la determinación de esta intensidad se ha utilizado el oscilador elastoplástico de un grado de libertad<sup>29</sup>.

Se define esta medida de intensidad como la suma de energías disipadas por histéresis y por unidad de peso, durante todo el movimiento inducido por el terremoto, por una población de osciladores simples elastoplásticos y que además tienen un pequeño amortiguamiento viscoso. Entonces la intensidad queda dada por:

$$I = \int_0^{\infty} E d\omega$$

donde:

$E$  : Energía disipada por histéresis y por unidad de peso por un oscilador elastoplástico.

$\omega$  : Frecuencia propia para pequeñas oscilaciones del oscilador en rad/seg.

Esta intensidad da un criterio del daño acumulado en la estructura, representado por el comportamiento no lineal idealizado en una curva de carga-deformación supuesta perfectamente elastoplástica.

El valor del amortiguamiento elegido es<sup>29</sup>  $c/c_c = 0,03$ , ya que este valor representa el amortiguamiento viscoso existente en algunas estructuras comunes.

Además pareció más razonable elegir un valor pequeño para el amortiguamiento viscoso, ya que se estaba considerando disipación de energía en el rango plástico.

Fuera de esto, la intensidad no va a depender en gran medida del valor del amortiguamiento viscoso, pues se ha encontrado<sup>18</sup> que este parámetro no induce una variación concluyente en los espectros de energía total disipada.

De los resultados obtenidos<sup>29</sup> en el cálculo de esta intensidad, a base del daño acumulado en una estructura elastoplástica simple y de los obtenidos mediante el cálculo basado en la energía disipada en un oscilador lineal simple, se deduce un ordenamiento similar de los sismos considerados en cuanto a intensidad.

Esto último lleva a concluir que en el cálculo de la intensidad propuesta por Arias, no es necesario adoptar un modelo elastoplástico, sino que basta usar un modelo de estructura lineal.

### DURACION MINIMA DEL TERREMOTO

Determinando el tiempo de espectro, o sea, el tiempo para el cual se obtiene cada ordenada de un espectro, se observa que para valores pequeños del grado de amortiguamiento, los tiempos de espectro de desplazamiento relativo, pseudovelocidad, velocidad relativa y aceleración absoluta se producen generalmente cerca del término del registro digitalizado (parte importante del acelerograma). Cuando el amortiguamiento es nulo, los tiempos de espectro se presentan aún más allá del término del terremoto, o sea, cuando la aceleración del suelo se anula.

Estudios preliminares realizados por el autor indicaron que una parte bien definida del registro total digitalizado determina la casi totalidad de los tiempos de espectro. Esto indicó que es posible seleccionar una duración de registro tal que dentro de ésta se produzcan las respuestas máximas, y que no se puede tomar una longitud arbitraria del registro, cuando se estudia la respuesta de estructuras sometidas a terremotos, sin correr el riesgo de obtener resultados muy alejados de los verdaderos.

Hasta la fecha en que se terminó este estudio no existía en la literatura especializada criterio alguno para decidir la duración del registro a digitalizar, si bien ha sido frecuente en el extranjero utilizar los primeros 4 o 5 segundos del temblor para obtener la respuesta de edificios sometidos a terremotos.

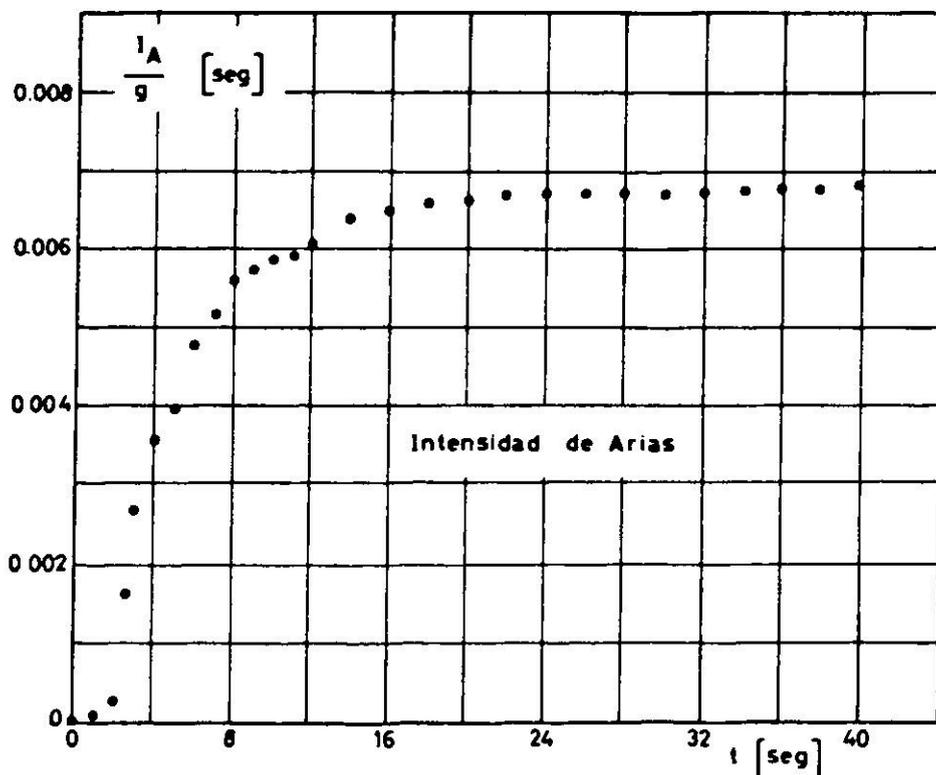


Fig. 5. Terremoto Ferndale, 11 de septiembre de 1938. Componente S-E.

Revisando los gráficos de intensidad de Arias,  $I_A$ , en función del tiempo, se observa que a partir de un cierto instante,  $I_A$  tiende a hacerse independiente del tiempo, o sea, el terremoto se hace más débil. En esta forma, la tendencia de  $I_A$  a la horizontal con el transcurso del tiempo puede tomarse como un criterio para la determinación de la parte importante del temblor. Cortando el acelerograma en la zona donde la curva comienza a ponerse horizontal, se desprecia la parte más débil del terremoto.

En forma parecida, la parte principal del temblor es detectada en el gráfico de la aceleración cuadrática media en función del tiempo en la zona anterior al punto en que la curva inicia un descenso suave. Cuando las ordenadas del acelerograma se hacen pequeñas, la aceleración cuadrática media tiende a una constante dividida por  $\sqrt{t}$ .

Se tiene así otro criterio simple, que requiere cálculos parecidos a los de  $I_A$ , para decidir la parte o duración mínima del terremoto que se requiere para determinar la respuesta de estructuras. En la Fig. 5 se presenta la intensidad de Arias y en la Fig. 6 la aceleración cuadrática media en función del tiempo para un terremoto dado.

De los dos criterios encontrados para elegir la duración mínima del acelerograma, se ha preferido proponer la intensidad de Arias, por el significado físico que posee.

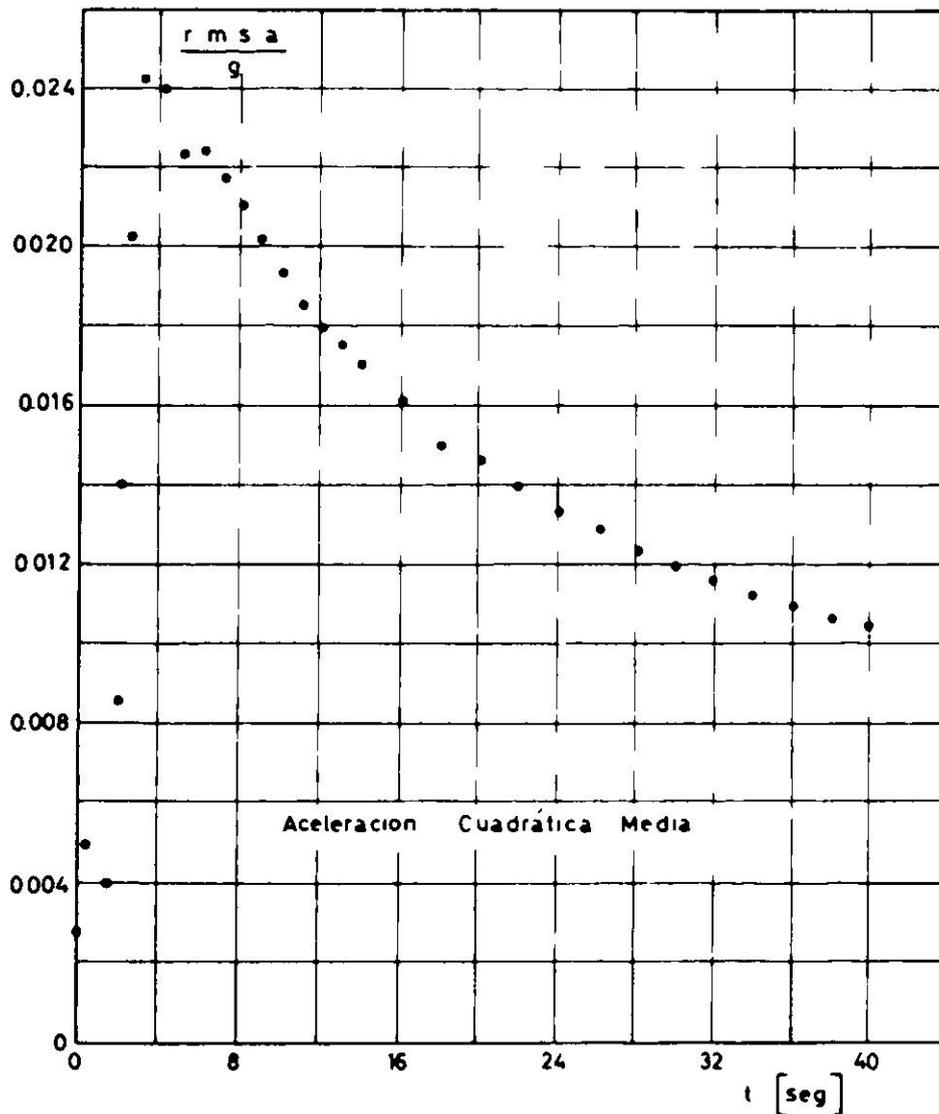


Fig. 6. Terremoto Ferndale, 11 de septiembre de 1938. Componente S-E.

## INFLUENCIA DEL AMORTIGUAMIENTO VISCOSO SOBRE LA RESPUESTA A TEMBLOR DE ESTRUCTURAS LINEALES

Por consideraciones teóricas, que consisten en suponer que el temblor sea representable por un tren de pulsos de aceleración distribuidos al azar en el tiempo y también en cuanto a signo y magnitud ("ruido blanco"), Hudson<sup>5</sup> obtuvo una expresión para el espectro medio de respuesta de velocidad máxima, para un grado de amortiguamiento  $n$ .

Ahora bien, suponiendo que la duración del tren de pulsos es grande comparada con el período natural del oscilador lineal simple, se concluye que la respuesta es proporcional a  $n^{0.5}$ . Este resultado puede extenderse a estructuras de varios grados de libertad, cuyos modos de vibrar sean ortogonales con frecuencias todas diferentes.

Arias y Husid<sup>19</sup>, tomando como base del análisis los espectros obtenidos por Alford, Housner y Martel<sup>11</sup>, analizaron la influencia del amortiguamiento viscoso, expresado como fracción del amortiguamiento crítico, sobre el espectro de respuesta de estructuras lineales de un grado de libertad. Así encontraron que para un período dado de la estructura, la razón entre la máxima aceleración de respuesta para un grado de amortiguamiento  $n$  y la correspondiente a un grado de amortiguamiento 0.20 es proporcional a  $n^{0.4}$ , para valores de  $n$  no inferiores a 0.02.

Los resultados fueron confirmados tomando como base los espectros medios propuestos por Housner<sup>20</sup> y los espectros medios obtenidos por Bycroft<sup>21</sup> para osciladores lineales sometidos a pulsos de aceleración distribuidos al azar.

## FUNCIONES DE AUTOCORRELACION DE ACELEROGRAMAS

### Generalidades

A través de la función de autocorrelación se trata de averiguar de qué manera y en qué medida interviene el azar en la constitución del registro de un terremoto, considerado éste como un proceso aleatorio o estocástico<sup>30</sup>.

La función de autocorrelación para un registro  $x(t)$ , calculada haciendo un promedio en el tiempo, se define a través de la expresión:

$$\rho_{\ddot{x}}(\tau) = \overline{\ddot{x}(t) \ddot{x}(t + \tau)} = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{t_0} \int_{\frac{t_0}{2}}^{\frac{t_0}{2} + \tau} \ddot{x}(t) \ddot{x}(t + \tau) dt \right\} \quad (17)$$

Pero, los terremotos son fenómenos transientes, de duración finita y, por lo tanto, no estacionarios. En consecuencia, las funciones de autocorrelación obtenidas a través de promedios en el tiempo sobre elementos individuales del conjunto de acelerogramas pueden caracterizar bien los registros de donde se obtienen, pero no al conjunto de terremotos, el cual podría tener características diferentes.

**El correlograma**

Con el objeto de comparar las funciones de autocorrelación correspondientes a funciones distintas, conviene normalizar aquellas de modo que para  $\tau = 0$  se tenga  $\rho(\tau) = 1$ . La función así obtenida se designará por:

$$R(\tau) = \frac{\rho(\tau)}{\rho(0)} \tag{18}$$

Los gráficos  $R(\tau)$  vs.  $\tau$  se denominarán correlogramas. Estos dan el coeficiente de correlación entre la aceleración registrada en el instante  $t$  y la aceleración registrada en el instante  $(t + \tau)$ .

El hecho de que el correlograma tenga la forma de una onda amortiguada significa que la correlación entre  $\ddot{x}(t)$  y  $\ddot{x}(t + \tau)$  se va haciendo menor a medida que crece  $\tau$ , aunque no monótonamente, ya que los correlogramas presentan oscilaciones.

Cualitativamente, se puede decir que mientras mayor sea la importancia de las componentes sinusoidales del acelerograma, menor será el amortiguamiento del correlograma, y las ordenadas de los máximos y mínimos del gráfico disminuyen lentamente. En cambio, mientras más importantes sean las componentes aleatorias de la función  $\ddot{x}(t)$ , más amortiguada resulta la función  $R(\tau)$ .

**Adaptación de la fórmula para el cálculo con computador digital**

Para el caso de los terremotos se puede hacer  $t_0$  igual al largo del registro y, en estas condiciones, la fórmula 17 queda:

$$\rho(\tau) = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \ddot{x}(t) \ddot{x}(t + \tau) dt \tag{19}$$

En general, el acelerograma estará digitalizado a intervalos desiguales. Entonces si se define  $N1$  como el número de puntos interpolados en el registro a intervalo  $\Delta t$ , la fórmula 19, expresada en términos de una sumatoria, se puede aproximar por la siguiente expresión:

$$\rho(\tau) = \rho(j\Delta t) = \frac{1}{N1-j} \sum_{i=0}^{N1-j} \ddot{x}(i\Delta t) \ddot{x}(i\Delta t + j\Delta t) \quad (20)$$

siendo  $j$  un índice que toma los valores  $0, 1, 2, \dots, \beta$ .

En el presente trabajo se eligió para  $\beta$  el número entero inmediatamente inferior al valor  $N1/4^{31,32}$ .

#### REFERENCIAS

1. BRADY, A.G. *Studies of response to earthquake ground-motion*, Earthquake Engineering Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1966.
2. BERG, G.V., y HOUSNER, G.W. Integrated velocity and displacement of strong earthquake ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 51, nº 2, (abril 1961), pp. 175-189.
3. CAUGHEY, T.K. Classical normal modes in damped linear dynamic systems, *Journal of Applied Mechanics*, (junio 1960), pp. 269-271.
4. CAUGHEY, T.K., y O'KELLY, M.E.J. Classical normal modes in damped linear dynamic systems, *Journal of Applied Mechanics*, (septiembre 1965), pp. 583-588.
5. HUDSON, D.E. Response spectrum techniques in engineering seismology, *Proceedings World Conference on Earthquake Engineering*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, 1956. 4.1 a 4.12.
6. HUDSON, D.E. Some problems in the application of spectrum techniques strong-motion earthquake analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 52, nº 2, (abril 1962), pp. 417-430.
7. BENIOFF, H. The physical evaluation of seismic destructiveness, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 24, (1934).
8. BIOT, M.A. Theory of vibration of buildings during earthquakes, *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*, vol. 14, nº 4, (1934).
9. BIOT, M.A. A mechanical analyzer for the prediction of earthquakes stresses, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 31, nº 2, (abril 1941).
10. BIOT, M.A. Analytical and experimental methods in engineering seismology, *Transactions ASCE*, vol. 108, paper nº 2.183, (1943).
11. ALFORD, J.L., HOUSNER, G.W., y MARTEL, R.R. *Spectrum analysis of strong-motion earthquakes*, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, Agosto 1951 (Revisado en agosto 1964).
12. HOUSNER, G.W. *Intensity of ground motion during strong-earthquakes*, Earthquake Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1952.
13. HOUSNER, G.W. Properties of strong ground motions earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 45, nº 3 (1955), pp. 197-218.
14. CAUGHEY, T.K., HUDSON, D.E., y POWELL, R.V. *The C.I.T. Mark II electric analog type response spectrum analyzer*, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1960.
15. INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR EARTHQUAKE ENGINEERING, *Earthquake-re-*

- sistant regulations, A world list, Tokio, 1963.*
16. ARIAS, A., HUSID, R., y MONGE, J. Comments on the new chilean seismic code for buildings, *Proceedings Fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Chile, (enero 1969).
  17. HUSID, R. *Curso de dinámica estructural*. Apuntes de clases, Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile, 1968.
  18. THOMAIDES, S. *Effect of inelastic action on the behaviour of structures during earthquakes*, Ph. D. Thesis, University of Michigan, 1961.
  19. ARIAS, A., y HUSID, R. Influencia del amortiguamiento viscoso sobre la respuesta a temblor de estructuras lineales, *Geofísica Internacional*, vol. 3, nº 1, (1963), pp. 1-10.
  20. HOUSNER, G.W. Behaviour of structures during earthquakes, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, vol. 85, EM 4, (agosto 1959), pp. 109-129.
  21. BYCROFT, G.N. Effect of stiffness taper in aseismic design, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 50, (1960), pp. 537-552.
  22. HOUSNER, G.W. Geotechnical problems of destructive earthquakes, *Géotechnique*, vol. 4, (1954), pp. 153-162.
  23. JENNIGS, P.C. *Response of simple yielding structures to earthquake excitation*, California Institute of Technology, Pasadena, California, junio 1963.
  24. GIBERSON, M.F. Maximum response ranges of nonlinear multistory structures subjected to earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58, nº 5, (octubre 1968), pp. 1639-1655.
  25. HUSID, R. *Gravity effects on the earthquake response of yielding structures*, Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, mayo 1967.
  26. HUSID, R. Colapso de estructuras elastoplásticas, *Revista del IDIEM*, vol. 6, nº 2, (octubre 1967), pp. 83-98.
  27. HUSID, R. The effect of gravity on the collapse of yielding structures with earthquake excitation, *Proceedings Fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Chile, enero 1969.
  28. LANGE, G. *Una medida de intensidad sísmica*, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1968.
  29. ARNOLD, P. *Intensidad Sísmica Definida a base del daño acumulado en una estructura elastoplástica simple*, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1969.
  30. ARIAS, A., y PETIT LAURENT, L. Funciones de autocorrelación y densidades de potencia de acelerogramas de movimientos fuertes, *Revista del IDIEM*, vol. 3, nº 3, (noviembre 1964), pp. 147-192.
  31. CHERRY, S., y BRADY, A.G. Determination of structural dynamic properties by statistical analysis of random vibrations, *Proceedings Third World Conference on Earthquake Engineering*, vol. II, pp. 50-67, New Zealand, 1965.
  32. JENKINS, G.M. General considerations in the analysis of spectra, *Technometrics*, vol. 3, nº 2, (mayo 1961), pp. 133-166.

**EARTHQUAKE CHARACTERISTICS. GENERAL ANALYSIS****SUMMARY:**

*The operations conducting to the analysis of acceleration spectra of earthquakes are presented in this paper together with the basic theoretical principles necessary to study the most outstanding earthquake characteristics from an engineer viewpoint.*

*A criterium is proposed to select upon the minimum duration of an accelerogram so that the response spectra won't differ too much from those derived from the consideration of the whole record.*