

Potencial Destructivo de Sismos (Primera Parte)

Lía Orosco e Isabel Alfaro Villegas¹

orosco@uolsinectis.com.ar

Resumen

El análisis de estructuras ante la acción sísmica exige que tal sollicitación sea definida en forma adecuada a los fines de obtener resultados confiables. Es común especificar tal carga dinámica por medio de espectros de respuesta o historias de aceleraciones en la base, según el método de cálculo empleado. Tal idealización de la acción debe reflejar las características propias del movimiento en el lugar de emplazamiento de la obra.

Las características dinámicas de la acción definen su potencia del daño, por lo que es importante valorizar este parámetro a fin de poder comparar registros diversos en vista a su uso como la acción dinámica sobre la estructura cuya respuesta debe calcularse.

En este artículo se analizan las características dinámicas de los registros sísmicos, mientras que los parámetros de potencial de daño serán analizados en una segunda parte del mismo trabajo.

Palabras claves: acelerogramas – potencial de daño- energía

1. Introducción

La respuesta de las obras civiles a la acción sísmica depende de la conjunción de las características particulares de la estructura y el movimiento que la solicita en su base. En el caso particular de

¹ Lía Orosco es Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Cataluña, en el área de la Ingeniería Sísmica. Es profesora titular de la cátedra Construcciones de Hormigón Armado, en la Facultad de Ingeniería e Informática de la UCASAL. Isabel Alfaro Villegas es Ingeniera Civil egresada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta y el presente trabajo formó parte de su labor como becaria BIEA del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta, bajo la dirección de la Ing. Orosco.

edificaciones, un mismo evento sísmico que afecta una ciudad, demanda respuestas distintas a estructuras iguales fundadas en dos sitios diferentes o a distintas estructuras ubicadas en el mismo sitio.

Las acciones sobre las estructuras deben ser definidas de modo que representen lo más certeramente posible el modo que son solicitadas realmente, para obtener así respuestas confiables. En el caso que se utilice para el diseño métodos dinámicos lineales o no lineales, se deben utilizar acelerogramas para definir la acción sísmica (INPRES-CIRSOC 103, 1983).

Los acelerogramas son la historia en el tiempo de las aceleraciones registradas en las bases de las estructuras y las características dinámicas que definen su potencial destructivo son básicamente tres: los valores picos, la duración del movimiento y su contenido espectral.

Este trabajo analiza las características dinámicas de los registros sísmicos que definen su capacidad de producir daño estructural, así como los parámetros propuestos para su definición.

2 Principales Características Dinámicas de los Movimientos Sísmicos

Los trazados de acelerograma de movimientos fuertes poseen variaciones erráticas en el tiempo y se pueden identificar sus características dinámicas de importancia a fin de compararlas con otras.

2.1 Valores Picos

El valor máximo de un registro (aceleración, velocidad o desplazamiento) es el más simple de los parámetros para identificar y comparar los movimientos sísmicos. El usado tradicionalmente es la aceleración pico. Los parámetros de respuesta espectral están relacionados linealmente y pueden ser medidos con respecto a la aceleración pico. Sin embargo, este parámetro no es necesariamente correlativa con la fuerza interna máxima desarrollada durante el sismo, especialmente cuando éste es de corta duración. La aceleración pico efectiva (ATC, 1978) se propone para compensar esa deficiencia y se define como la aceleración pico que produce una respuesta espectral

similar promedio en sistemas de un grado de libertad (S1GDL) con un amortiguamiento del 5%, en un rango de período de 0.1-0.5 segundos.

La fórmula del corte basal de varios códigos como el canadiense NBCC (1980) y el argentino (IC 103) están basados en este concepto pues se derivan de espectro elásticos. Los espectros elásticos de diseño se construyen multiplicando los valores picos del movimiento del suelo (desplazamiento, velocidad y aceleraciones) por factores de amplificación espectral apropiados. Este tipo de espectros está asociado a sismos intensos “normales”, y distancias hipocentrales moderadas.

Sin embargo hay sismos que se apartan de de las características puestas en evidencia por estos espectros. Zhu et al. (1988) definen tres tipos de registros:

a - Acelerogramas con contenido energético en un amplio rango de frecuencias

b - Acelerogramas con oscilaciones de alta frecuencia y amplitudes significativas, en la fase intensa del movimiento.

c - Acelerogramas que consisten en pocos pulsos de gran duración.

Estas características manifiestan la influencia de las condiciones locales del suelo, la distancia epicentral, magnitud y duración del movimiento.

2.1.1 Relación (a/v)

Se propone entonces un nuevo parámetro que refleja de mejor manera estas peculiaridades, la relación a/v donde a es la aceleración máxima del suelo expresada en porcentaje de g , y v es la velocidad absoluta máxima expresada en metros por segundo. La aceleración pico está relacionada con las altas frecuencias y la velocidad pico con oscilaciones de moderadas y bajas frecuencias. Por lo tanto, los registros del tipo b, con alto contenido frecuencial en la fase intensa del movimiento, tendrán altos valores de la relación a/v , y grandes valores espectrales para períodos bajos, mientras que los largos e intensos pulsos que exhiben los acelerogramas del tipo c, se corresponderán con bajos valores de la relación a/v y pronunciados valores espectrales

para los períodos moderados y altos. Los registros claramente irregulares del primer tipo, resultan generalmente en valores medios de α/v y espectros de respuesta del tipo que las normas sustentan.

La atenuación de la velocidad con la distancia es menor que la de las aceleraciones, por lo que las historias registradas cerca de la fuente muestran valores elevados para la relación α/v , mientras que para distancias mayores, esta relación disminuye. En cuanto a las condiciones geológicas del suelo en el sitio considerado, la relación α/v muestra los valores mayores para roca, y disminuye conforme los suelos son más blandos.

Una importante relación entre el parámetro α/v y la amplitud del espectro de respuesta elástico, fue encontrada por Zhu et al. (1988), quienes dividen a los sismos en tres grupos, en base a la relación α/v que exhiben

Grupo I: los que tienen valores altos de α/v (mayores de 12 1/seg).

Grupo II: los que tienen valores medios de α/v (entre 8 1/seg y 12)

Grupo III: los que tienen valores bajos de α/v (menores a 8 1/seg).

El Código de Canadá de 1985 (NBCC, 1985) toma este criterio para la determinación del corte basal. Clasifica los valores de α/v en bajos, (grupo III), medios (grupo II) y altos (grupo I).

Este parámetro puede ser usado alternativamente por su relación inversa (v/α). Sucuoglu y Nurtug (1995) atribuyeron a este parámetro distintas interpretaciones para movimientos de suelo de tipo impulsivo y armónico. Si la velocidad pico es alcanzada inmediatamente después de un pulso dominante en el acelerograma, entonces la relación v/α indica la duración promedio del pulso, de acuerdo a las leyes de la cinemática.

El parámetro v/α también está relacionado con la frecuencia de vibración dominante (o lo que es lo mismo, el período) para movimientos armónicos o de banda estrecha, de la siguiente manera

$$T = 2 \pi \left(\frac{v}{\alpha} \right) \quad (1)$$

Tso et al. (1993) encontraron una buena correlación entre el período (o frecuencia) en el que el espectro de energía de los movimientos de suelo alcanza los valores picos, y la relación v/α . Sin embargo en un estudio realizado a una población de 94 registros, Sucuoglu y Nurtug (1995) no visualizaron en forma clara esta tendencia, salvo el caso de movimientos casi armónicos.

Sawada et al. (1992) encontraron aspectos relacionados entre las principales características del espectro de potencia y este parámetro, que se pueden resumir en los siguientes puntos

a) Cuanto más grande es la relación α/v , menor es el ancho de banda central del espectro de potencia.

b) Cuanto menor es la relación α/v más grande es la dispersión del espectro de potencia, con respecto a la frecuencia central.

La dispersión fue cuantificada por la medida de ancho de banda espectral de Vanmarcke, δ (Vanmarcke, 1980), que se expresa como

$$\delta = \sqrt{1 - \frac{\lambda_2^2}{\lambda_0 \lambda_1}} \quad (2)$$

donde λ_i con $i=1,2,3$ son los momentos espectrales del espectro de potencia. Un valor de $\delta > 0,66$, indica un proceso de banda estrecha, mientras que si el valor es menor se trata de un proceso de banda ancha, tipo ruido blanco.

2.2 Duración efectiva

La duración de los movimientos sísmicos es una importante característica de los registros que se debe considerar en el análisis de la respuesta de edificios y suelos, tanto lineal como no-lineal, ya que es determinante en la cantidad de energía que se suministra a la estructura. Se sabe la importancia de este parámetro para estudios de licuefacción y deformaciones permanentes de suelos, como así también en los estudios probabilísticos de respuesta estructural y en los algoritmos de generación de acelerogramas artificiales (Trifunac y Novikova 1994). A pesar de que la duración de los sismos es sumamente importante en los análisis no lineales de estructuras, no ha

sido aún introducido en los códigos de modo claro. Así es como los efectos de fatiga y fluencia no lineal son ignorados o tratados en forma demasiado simplificada.

Los primeros estudios acerca de la duración de la fase más intensa consideraron su dependencia con respecto a la magnitud y la distancia epicentral, pero sin poder expresar en forma cuantitativa tal relación. En general, se define la duración de la parte intensa de un acelerograma, como la porción en que se manifiesta una respuesta estructural intensa.

Se formularon distintas propuestas para definir este concepto. Así, las primeras definieron la duración de la fase intensa como el tiempo comprendido entre la primera y última vez en que el registro alcanza un valor umbral de amplitud; normalmente se toma para este umbral el valor de $0.05 g$ (Bolt 1989).

Kawashima y Aizawa (1989) mejoraron esta definición, introduciendo el concepto de **duración normalizada**, la cual definieron como el tiempo transcurrido entre la primera y última vez en que la historia de aceleraciones alcanza el valor de μ veces la aceleración pico. Luego, Mohraz y Peng (1989) introducen en la definición del concepto parámetros estructurales (frecuencia y amortiguamiento), usando un filtro pasa-baja para calcular la duración efectiva.

Otros estudios, que tienen a Trifunac como principal exponente, definen este parámetro con mayor énfasis en su relación a la energía que un terremoto confiere a la estructura (Trifunac y Brady 1975; Westermo y Trifunac 1979; Novikova y Trifunac 1993a). Para analizar esta relación, se considera el trabajo por unidad de masa realizado por osciladores simples en todo el rango frecuencial $(0, \infty)$. Este trabajo es proporcional a $\int_0^{\infty} a^2(t) dt$. La energía sísmica radiada desde la fuente es proporcional a $\int_0^{\infty} v^2(t) dt$, donde v es la velocidad del suelo. A su vez, el valor esperado de los valores extremos de una función aleatoria $f(t)$, (que podría ser en este caso aceleración, velocidad o desplazamiento del suelo) dependen del número de valores picos P , proporcional a la duración del sismo y del valor cuadrático medio de la función $f(t)$. El común denominador de todos los conceptos nombrados es la integral $\int f^2(t)$, por lo que resulta natural definir la duración efectiva del sismo como el tiempo en el que la mayor parte del trabajo (por ejemplo, el 90%) es realizado, o en otras palabras el tiempo en el cual se registra el

90 % de la contribución a la **intensidad del registro**, que se define como

$$\int_0^t f^2(\tau) d\tau \quad (3)$$

donde $f(t)$ representa la historia de aceleraciones, velocidades o desplazamientos. Esta duración efectiva puede ser sustancialmente más corta que la duración total del registro, y en cuanto a la respuesta estructural, ésta puede tener una duración efectiva más larga que la duración del registro en estructuras con poco amortiguamiento.

Trabajos más recientes de Trifunac y Westermo y sobre todo de Novikova y Trifunac (1993b, 1993c), estudian la influencia del contenido espectral en la duración efectiva del sismo, mediante el filtrado de las señales en 12 bandas, comprendidas entre las frecuencias 0.075 y 21 Hz, analizando el problema de la duración efectiva en cada banda, en base al concepto básico de Trifunac. El objetivo del estudio es dilucidar la influencia que la magnitud, distancia epicentral (con especial énfasis en el paso de las ondas por los distintos medios) y las condiciones locales topográficas y geológicas, ejercen sobre el concepto de duración de la parte intensa del registro, mediante la formulación de modelos basados en técnicas de regresión multilinear.

La duración efectiva puede ser estimada como

$$t_d = \tau_f + \tau_p + \tau_s \quad (4)$$

Donde τ_f , representa la duración del proceso en la fuente, τ_p es la contribución a la duración del paso de las ondas en su viaje al sitio en consideración, y τ_s representa el probable aumento de esta duración debido a las condiciones locales de la topografía y del suelo. Entre las numerosas e interesantes conclusiones que se desprenden de estos importantes estudios, se verifica que no existe una dependencia entre la duración y la magnitud a bajas frecuencias, ya que la dimensión de la fuente es menor que la longitud de onda en este caso. Pero a medida que la frecuencia aumenta, esta dependencia es lineal primero y cuadrática después. En cuanto a la influencia de la topografía (geometría) de los sedimentos donde se ubica el sitio, son dos parámetros los que inciden en su estimación

a) la distancia entre la estación de registro (o de interés) y algún afloramiento rocoso que producirá reflexión de las ondas y

b) la profundidad de los depósitos sedimentarios.

En la investigación de referencia se constató que en la banda central de frecuencias consideradas se manifiesta la influencia de la geometría, no así para bajas o altas frecuencias. Como es de esperarse, las componentes horizontales del movimiento son más sensibles al parámetro de forma y las verticales al parámetro que considera la profundidad de los depósitos sedimentarios.

Las condiciones locales del suelo en el específico sitio de interés es por ahora más difícil de cuantificar, debido a que no se cuenta con información detallada acerca de las características geológicas del suelo en el lugar de registro de los acelerogramas que se utilizaron en el trabajo de investigación. Pero la influencia se aprecia en todo el espectro frecuencial considerado, a diferencia de la influencia de las condiciones geográficas más generales.

La cuestión es si las relaciones encontradas para ciertas regiones con muchos registros reales son aplicables a otras regiones donde no se cuenta con tal cantidad de registros. En este caso debería tenerse información de los mecanismos de generación en la fuente de estos sismos, y por supuesto la similitud total en las condiciones geológicas, tectónicas y geográficas, a fin de empezar a usarse con gran cuidado y criterio. Además, esta semejanza sólo es aplicable para la estimación de sismos pequeños y moderados, quizás con magnitud menor de 6, ya que el fenómeno de sismos de mayor magnitud es más complejo y tienen características propias en cada región.

Así lo demuestra un estudio de comparación entre registros del oeste norteamericano y la ex-Yugoslavia, donde se observan importantes diferencias en los resultados debido a las diferentes condiciones locales, que tienen que ver principalmente con el factor de atenuación Q , la velocidad de ondas y la diferente edad geológica de los sedimentos (Novikova y Todorovska 1994).

2.3 CONTENIDO FRECUENCIAL

Además de los valores picos y la duración efectiva de los sismos, el contenido frecuencial es decisivo para determinar el potencial destructivo de los sismos.

2.3.1 Espectros de respuesta

Existen varios parámetros para estimar en que banda de frecuencia el sismo que afecta una estructura transporta mayor cantidad de energía. El más utilizado en el ámbito del cálculo estructural es el espectro de respuesta, en base al cual la mayoría de las normas sismorresistentes determinan la acción sísmica. A tal fin se definen los espectros de diseño, que tienen características particulares que los diferencian con respecto a espectros de respuesta de registros sísmicos particulares; en este artículo, se hace referencia a espectros de registros individuales.

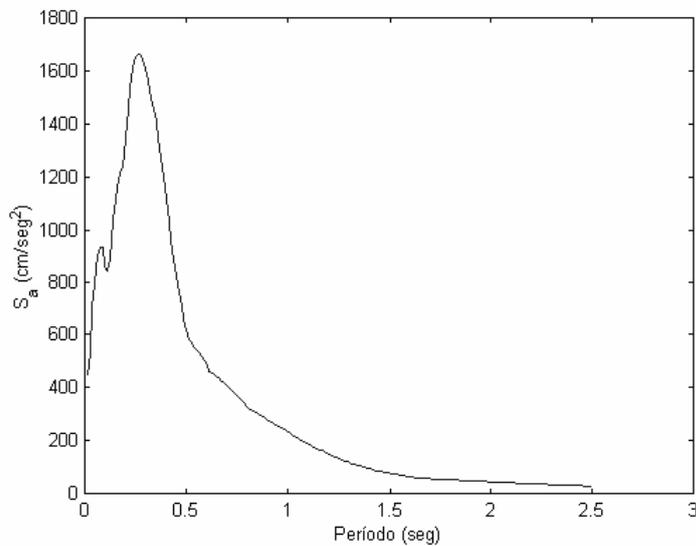


Figura 1: Espectro elástico del registros LHTR

Sabida es la naturaleza no estacionaria de los sismos, entendiéndose por tal a la variación de la amplitud con el tiempo, pero es también igualmente importante la variación temporal de la

frecuencia. Si bien desde un principio la no estacionariedad en el tiempo pudo ser analizada y estudiada con detalles en los registros que se iban obteniendo, el estudio de las variaciones de la frecuencia fue posterior, a pesar de ser reconocida desde siempre en forma cualitativa por simple inspección de los registros, debido a que su valoración cuantitativa es más compleja.

En la figura 1 se muestra el espectro de respuesta correspondiente al registro LHTR. Como se aprecia la energía se concentra en un rango angosto de períodos bajos (0,2-0,5 segundos).

2.3.2 Espectros evolutivos

La no - estacionaridad de los movimientos sísmicos se da en el dominio de las amplitudes (valor cuadrático medio variable con el tiempo) y en el dominio de las frecuencias (función de densidad espectral de potencia variable en el tiempo). Un modo de analizar y poner en evidencia ambas características es mediante el uso del concepto de espectro evolutivo. Otras propuestas son el espectro físico y el espectro instantáneo, que se pueden consultar en el trabajo de Barbat et al. (1994).

Antes de explicitar el concepto de espectro evolutivo se definirá la función de densidad espectral de potencia.

2.3.2.1 Función de autocorrelación y de densidad espectral de potencia

El análisis del contenido espectral de movimientos sísmicos está íntimamente relacionado al estudio de la energía que ese sismo "transporta". Como los sismos son procesos aleatorios, las funciones de distribución de segundo orden son las herramientas estadísticas apropiadas para su análisis, debido a las siguientes razones:

a.) Las distribuciones de segundo orden tienen relación con la energía.

b.) Conociendo la función de distribución de segundo orden de la entrada (input) de un oscilador lineal, quedan determinadas las mismas funciones para la salida (output) del oscilador.

c.) La descripción de segundo orden incluye la de primer orden.

El momento de segundo orden de un proceso aleatorio X , llamado función de autocorrelación, que se define como

$$R_X(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) X(t + \tau) dt \quad (5)$$

es importante para analizar registros sísmicos (figura 2).

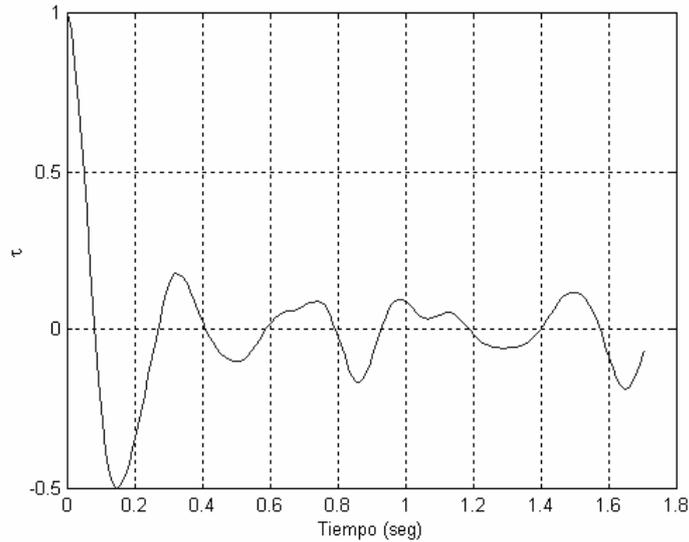


Figura 2: Correlograma del registro LHTR

La función densidad espectral de potencia se define como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación

$$S_X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_X(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (6)$$

La figura 2 muestra el correlograma de LHTR; se aprecia que es posible realizar alguna inferencia sólo hasta un rango de 0.3 segundos, en cada punto del acelerograma considerado. En la figura 3 se representa el espectro amplitudes de Fourier, que guarda una estrecha relación con los espectros de potencia, ya que describen el contenido energético de la señal.

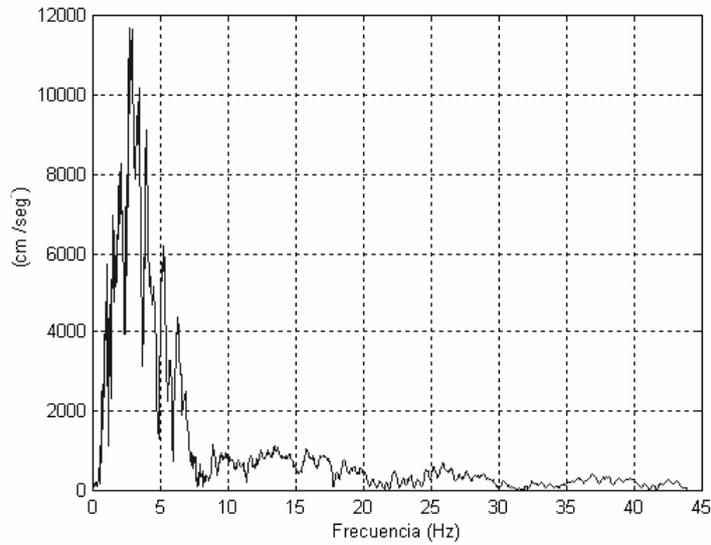


Figura 3: espectro de amplitudes de Fourier de LHTR

2.3.2.2 espectro evolutivo

El concepto de **espectro evolutivo** fue introducido por Priestley (1965) y se aplica a aquellos procesos no estacionarios conocidos como procesos oscilatorios. Se dice que un proceso $X(t)$ es oscilatorio, si existe una familia de funciones oscilatorias deterministas, $\psi(t, \omega)$, tal que:

$$\Psi(t, \omega) = \psi(t, \omega) e^{i\omega t} \quad (7)$$

Donde $\psi(t, \omega)$ es una función de modulación que varía lentamente con el tiempo. Pudiendo expresarse $X(t)$:

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t, \omega) e^{i\omega t} dZ(\omega) \quad (8)$$

Considerando que el proceso $X(t)$ corresponde a la aceleración del suelo, $a(t)$ originada por el sismo, se tiene:

$$a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(t, \omega) e^{i\omega t} dZ(\omega) \quad (9)$$

donde $Z(\omega)$ es un proceso aleatorio ortogonal y los incrementos $dZ(\omega)$, $dZ(\omega')$, ... son variables aleatorias no correlacionadas. La forma más conveniente de definir la lenta variación de $\psi(t, \omega)$ es expresando que su transformada de Fourier está altamente concentrada en la región de frecuencia nula.

$$A(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dH(\omega, \phi) \quad (10)$$

donde $dH(\omega, \phi)$ tiene un máximo absoluto en $\phi = 0$. Esta restricción en la selección de $\psi(t, \omega)$ preserva la interpretación física de ω como una frecuencia, un concepto fundamental en procesos no estacionarios (Priestley 1977).

Un proceso estacionario \ddot{X}_e cualquiera tiene una representación espectral del tipo:

$$\ddot{X}_e(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dZ(\omega) \quad (11)$$

Lo que equivale a decir que un proceso estacionario puede ser representado como una suma de ondas senoidales y cosenoidales, con diferentes frecuencias ($e^{i\omega t}$) y amplitudes y fases aleatorias $dZ(\omega)$. Así, la función de densidad de potencia de un proceso estacionario puede interpretarse como la distribución de la energía en el campo de las frecuencias.

$$E[\ddot{X}_e^2] = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (12)$$

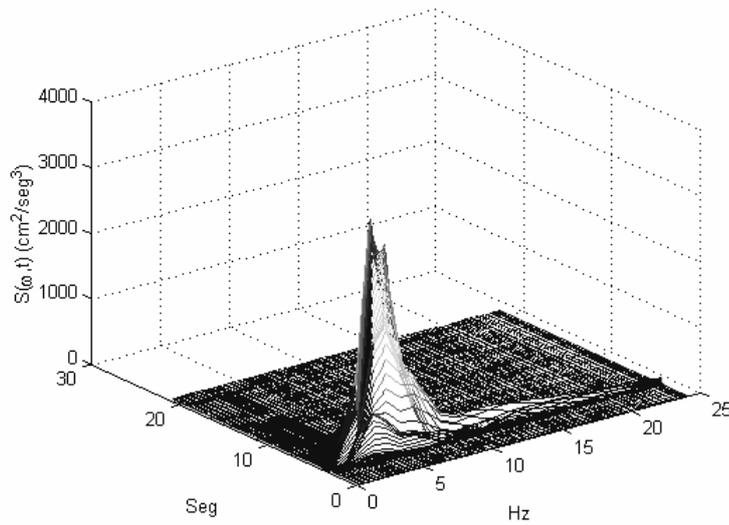


Figura 4: espectro evolutivo de LHTR

Considerando ahora el proceso no estacionario $a(t)$, las funciones $(e^{i\omega t})$, no pueden ser usadas ya como elementos básicos, pues son intrínsecamente estacionarias. Por ello se deben proponer otras funciones básicas, que si bien son no estacionarias, mantienen la forma oscilatoria y en las que el concepto de frecuencia es fundamental. La función $\Psi(t, \omega) = \psi(t, \omega) e^{i\omega t}$ cumple con esta premisa y con la restricción dada en la ecuación (10).

2.3.2.3. Interpretación física del espectro de Priestley

Suponiendo una función determinista armónica y amortiguada, del tipo:

$$x(t) = A e^{-(t/\alpha)^2} \cos(2\omega_0 t + \phi) \quad (13)$$

Si se hace un análisis convencional de Fourier, $X(\omega)$ tiene componentes en todas las frecuencias, pues hay dos funciones Gaussianas centradas en $\pm \omega_0$. Si se quisiera representar $x(t)$ como la suma de senos y

cosenos con amplitudes constantes, se precisarían infinitas componentes frecuenciales. Sin embargo, se describe $x(t)$ considerando que contiene dos frecuencias $\pm \omega_0$, cuyas amplitudes varían en el tiempo según $Ae^{-(t/\alpha)^2}$.

Por lo tanto, si se considera una función no periódica $a(t)$, cuya transformada de Fourier tiene un máximo absoluto en las frecuencias $\pm \omega_0$, esa frecuencia puede definirse como la frecuencia de la función, ya que localmente $a(t)$ se comporta como una función armónica convencional de frecuencia ω_0 , modulada por una función que varía suavemente en función del tiempo. Este razonamiento interpreta físicamente el concepto del espectro evolutivo. La ecuación (8) es una generalización directa de la expresión (13). La expresión (8) es entonces el límite de una suma de senos y cosenos de diferentes frecuencias, cuyas amplitudes varían aleatoriamente en el tiempo (Valerio 1992)

El valor cuadrático esperado del proceso no estacionario es (Shinozuka et al., 1987; Crempien y Araneda 1993) :

$$E[a^2] = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t, \omega)|^2 dF(\omega) \quad (14)$$

donde $dF(\omega) = E[dZ(\omega)]^2$

$$E[a^2] = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t, \omega)|^2 f(\omega) d\omega \quad (15)$$

lo que define a la densidad espectral de potencia como:

$$S(t, \omega) = |\psi(t, \omega)|^2 f(\omega) \quad (16)$$

La ecuación anterior puede entenderse como una directa generalización de la expresión (12) de tal modo que el valor cuadrático medio de todas las realizaciones es:

$$E[a^2(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} S(t, \omega) d\omega \quad (17)$$

$S(t, \omega)$, la función de densidad espectral de potencia evolutiva, describe para cada instante t , la distribución en el campo de frecuencia del valor cuadrático medio en la vecindad de tal instante. Se deduce de las expresiones (15) y (16) que el espectro de potencia evolutivo es

$$S(t, \omega) = |\psi(t, \omega)|^2 f(\omega) \quad (18)$$

donde $f(\omega)$ es una función de densidad espectral.

2.3.2.4 Determinación del espectro evolutivo

Kameda (1976) propuso el uso de la técnica multifiltro, que fue utilizada con éxito también en la estimación de procesos oscilatorios transientes cualesquiera. Esta tiene la ventaja sobre el uso de repetidas transformadas de Fourier, de ahorrar tiempo de cálculo y el lograr mejor resolución en el dominio del tiempo de componentes espectrales de varias frecuencias. El concepto básico es el uso de osciladores simples que funcionan como varios filtros. Al considerar un amortiguamiento constante en ellos, se tiene el mismo efecto que variar la longitud de la ventana en forma inversamente proporcional a la frecuencia, con lo que es posible obtener detalles de la variación en el tiempo de las componentes espectrales de alta frecuencia.

La ecuación de movimiento de un oscilador simple, considerado como un filtro no recursivo y causal, sujeto aleatoriamente a una aceleración $a(t)$ en su base es:

$$\ddot{x}(t) + 2\xi_0\omega_0\dot{x}(t) + \omega_0^2x(t) = -a(t) \quad (19)$$

donde $x(t)$ es el desplazamiento relativo del oscilador sujeto a tal aceleración; este desplazamiento es de naturaleza aleatoria como la acción; ξ_0 y ω_0 son el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia natural de vibración. La respuesta aleatoria $R(t)$, en función de la energía total del oscilador simple, es:

$$R_{\omega_0}^2(t) = \frac{Q(t)}{\frac{k}{2}} = x^2(t) + \frac{\dot{x}^2(t)}{\omega_0^2} \quad (20)$$

Para valores pequeños del coeficiente de amortiguamiento $R(t)$ es una función suave del tipo que representa la envolvente de $x(t)$. Asumiendo que la variación de $S(t, \omega)$ es también suave con respecto a la fase final de la respuesta a un pulso unitario del filtro, la media cuadrática de $x(t)$ y $\dot{x}(t)$ es dada aproximadamente por:

$$\sigma_x^2(t) \cong \frac{\pi}{4\xi_0\omega_0^3} S(t, \omega_0) \quad (21)$$

$$\sigma_{\dot{x}}^2(t) \cong \frac{\pi}{4\xi_0\omega_0} S(t, \omega_0) \quad (22)$$

Por lo que se estima el espectro evolutivo mediante la siguiente expresión:

$$S(t, \omega_0) \cong \frac{2\xi_0\omega_0^3}{\pi} E[R_{\omega_0}^2(t)] \quad (23)$$

En la técnica multifiltro para la evaluación del espectro evolutivo, el coeficiente de amortiguamiento es lo que controla el ancho de banda de filtrado, tanto en el campo temporal como frecuencial. Un coeficiente de amortiguamiento pequeño produce alta resolución en el campo frecuencial y viceversa.

A los fines de disminuir el efecto de desfasaje en el dominio del tiempo, Shrerer et al. (1982) consideraron la parte transiente de la respuesta de los osciladores. Mientras que en la propuesta de Kameda se hace uso de un coeficiente de amortiguamiento constante, lo que implica una variación en la ventana en el tiempo, en la segunda propuesta se considera un amortiguamiento variable. Esto último implica considerar un ancho de ventana constante; a fin de determinar tal parámetro, se recurre al uso del concepto de semiancho de banda b considerando que con éste se obtiene una buena resolución frecuencial.

El semiancho de banda se expresa en función del amortiguamiento como

$$b = 2 \omega_n \xi_n \quad (24)$$

Con el objetivo de evitar intervalos superpuestos en el cálculo del espectro evolutivo en el campo frecuencial se usa un ancho de banda constante, igual al intervalo de discretización.

La figura 4 muestra el espectro evolutivo LHTR determinado según la técnica multifiltro de Kameda.

3. Comentarios finales

En esta primera parte se explican las características dinámicas de los sismos que definen su capacidad para producir daño. Ha sido el objetivo de los estudios definir correctamente la acción sísmica, ya que ello significa estimar correctamente la carga (en este caso dinámica) de la estructura. Esta definición debe corresponderse con la capacidad de producir daño de las distintas acciones de diseño.

En general, la mayor parte de las normas sísmicas adoptan los espectros de diseño elástico para definir las acciones de diseño, los que reflejan los valores picos y las frecuencias con mayor contenido energético, pero son insensibles a la duración o la evolución de la energía con el tiempo.

Los esfuerzos actuales en este campo se encaminan a proponer mejores modos de definir esta carga, pero sin abandonar la simplicidad y claridad conceptual para que sea acertadamente aplicada por los profesionales del diseño y cálculo estructural.

Bibliografía

ATC, Applied Technology Council 1978, Tentative provisions for the development of seismic regulations for new buildings, ATC 3-06, NSF Publication, 78 - 8

Barbat, A., Orosco, L., Hurtado, J.E. y Galindo M., 1994, Definición de la acción sísmica, Monografías de Ingeniería Sísmica, Editor: Alex

Barbat, Centro Internacional en Métodos Numéricos en Ingeniería, Monografía CIMNE IS-10, Barcelona, España

Bolt, B.A., 1989, The nature of earthquake ground motion, in F. Naeim (ed.), The seismic Design Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York

Crempien-Laborie, J. y Araneda, P., 1993, Simulación de acelerogramas consistentes con la sismicidad local, Tesina de Habilitación Profesional, Universidad de Concepción, Chile.

INPRES—CIRSOC, 1983, INPRES-CIRSOC 103: Normas argentinas para construcciones sismorresistentes, Instituto Nacional de Prevención Sísmica - Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles del Sistema INTI, Buenos Aires

Kameda, H., 1976, Evolutionary spectra of seismogram by multifilter, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol 101, No EM6, pp 787-801

Kawashima, K. and Aizawa, K., 1989, Bracketed and normalized durations of earthquake ground acceleration, Earthq. Eng. and Struc. Dyn., Vol 18, pp 1041--1051

Mohraz, B. and Peng, M.M., 1989, Use of a low-pass filter in determining the duration of strong ground motions, ASME, Pressure Vessels and Piping Division, Publication PVP 182, New York, pp 197 – 200

NBCC: Associate Committee on National Building Code, 1980, National building code of Canada -- 1980. NRCC No 17303, National Research Council, Ottawa.

NBCC: Associate Committee on National Building Code, 1985, National building code of Canada – 1985, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario

Novikova, E.I. and Trifunac, M.D., 1993a, Duration of strong ground motion: physical basis and empirical equations, Dept.of Civil Engineering, Rep No 93--02, University Southern California, Los Angeles, California

Novikova, E.I. and Trifunac, M.D., 1993b, Modified Mercalli intensity and the geometry of the sedimentary basin as scaling parameters of

the frequency dependent duration of strong ground motion, *Soil Dynam. Earthq. Engng*, Vol 12(4), pp 209-225

- Novikova, E.I. and Trifunac, M.D., 1993c, Modified Mercalli intensity scaling frequency of the frequency dependent duration of strong ground motion, *Soil Dynam. Earthq. Engng*, Vol 12 (5), pp 309--322
- Novikova, E.I. and Todorovska, M.I., 1994, Comparison of duration of strong motion in California and Yugoslavia, *Proceedings of 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Austria, Viena, pp 189--194
- Priestley, M.B., 1965, Evolutionary spectra and non stationary process, *Journal Royal Statistical Society*, Vol 27, pp 204 - 237
- Priestley, M.B., 1971, Some notes on the physical interpretation of spectra of non--stationary processes, *Journal of Sound and Vibration*, Vol 17, pp 51-54
- Sawada, T., Hirao, K., Tsujihara, O. and Yamamoto, H., 1992, Relationship between maximum amplitude ratio (a/v , $ad/2$) and spectral parameters of earthquake ground motion, *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Vol 2, 617 - 622
- Scherer, R.J., Riera, J.D., and Schueller, G.I., 1982, Estimation of the time-dependent frequency content of earthquake accelerations, *Nuclear Engineering and Design*, Vol 71, pp 301 - 310.
- Shinozuka, M., Deodatis, G. and Harada, T., 1987, Digital simulation of seismic ground motion, *Technical Report NCEER - 87 - 0017*
- Sucuoglu H. and Nurtug A., 1995, Earthquake ground motion characteristics and seismic energy dissipation, *Earthq. Eng. Struc. Dyn.*, Vol 24, 1995, pp 1195 - 1213.
- Trifunac, M.D. and Brady, A.G., 1975, A study on the duration of strong earthquake motion, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol 65, pp 581 – 626.
- Trifunac, M.D. and Novikova, E.I., 1994, State of the art review on strong motion duration, *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Austria, Viena, pp 131 - 140

- Tso, W.K., Zhu, T.J. and Heidebrecht, A.C., 1993, Seismic energy demands on reinforced concrete moment resistant frames, *Earthq. Eng. and Struc. Dyn.*, Vol 22, pp 533 – 545.
- Valerio, J., 1992, Spectral analysis of earthquake accelerations as realizations of a non - stationary process, *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Vol 2, pp 901--907*
- Vanmarcke, E., 1980, Parameters of the spectral density function, their significance en the time and frequency domain, *MIT Civil Engineering and Design*, 60--1
- Westermo, B.D. and Trifunac, M.D., 1979, Correlations of the frequency dependent duration of strong ground motion with the Modified Mercalli Intensity and the depth of sediments at the recording site, *Dept. of Civil Engng, Report No 78 -- 12, Universidad of Southampton, Los Angeles, California*
- Zhu, T.J., Heidebrecht, A.C. and Tso, W.K., 1988, Effect of peak ground acceleration to velocity ratio on ductility demand of inelastic systems, *Earthq. Eng. and Struc. Dyn.*, Vol 16, 63--79