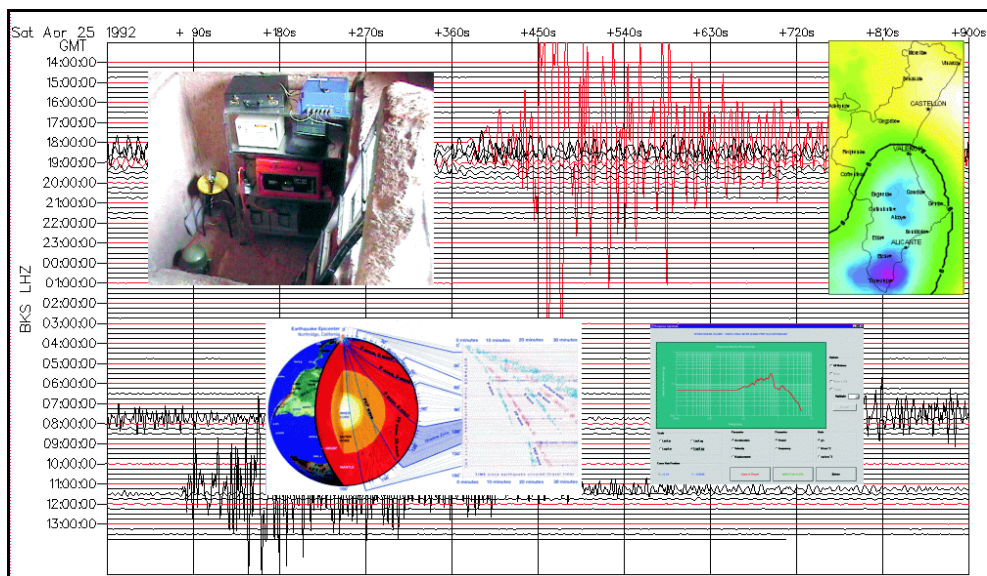




Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ÁREA DE FÍSICA
DE LA TIERRA

SISMOLOGÍA E INGENIERÍA SÍSMICA (PRÁCTICAS)



PRACTICA 5. TRATAMIENTO DE ACELEROGRAMAS.

1. OBJETIVO

Aprender a llevar a cabo una determinación lo más exacta posible de los valores de aceleración que se han producido en el lugar de registro durante un terremoto y obtener aquellos parámetros de interés en la ingeniería sismológica que se obtienen a partir de los registros de aceleración. Aprender a utilizar el programa DEGTRA (2000) (Ordaz y Montoya, 2000) para llevar a cabo dichos objetivos.

2. TEORIA

Tanto el registro de acelerogramas como su tratamiento han ido cambiando a medida que han evolucionado los sistemas de adquisición y el almacenamiento y procesado de los datos.

El conocimiento de las fuerzas que actúan sobre un emplazamiento, debida a los terremotos, el análisis de sus efectos sobre las estructuras, el desarrollo de normas de construcción y los métodos para determinar el riesgo sísmico sobre las construcciones son algunas de las principales motivaciones para el estudio de acelerogramas.

En ellos, el parámetro de mayor interés es la aceleración del suelo, aunque también son importantes, la velocidad y el desplazamiento. Así si suponemos una estructura simple con una masa concentrada en su tejado (Figura 1) y consideramos la fuerza lateral concentrada en los elementos verticales, que serían las paredes o columnas. Aplicando las leyes de Newton del movimiento tenemos que :

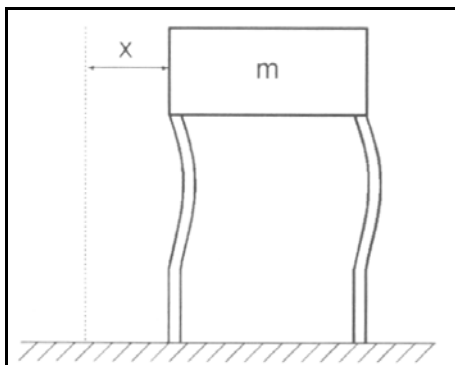


Figura 1 Estructura sometida a una fuerza lateral.

$$m\ddot{x} + f(x, \dot{x}, t) = -m\ddot{z}(t)$$

ecuación que nos da la respuesta al terremoto como si la estructura estuviera fija por la base y sometida a una fuerza dinámica $-m\ddot{z}(t)$, $-f(x, \dot{x}, t)$ es la fuerza restauradora del edificio que es función de la desviación relativa, $x(t)$ y de su derivada. Así, la fuerza efectiva de carga debida al terremoto en un punto de la masa es igual a tantas veces la masa por la aceleración del suelo. De esta ecuación vemos que los edificios construidos, por ejemplo, en

Práctica 5.

Tratamiento de acelerogramas

piedra, y caracterizados por grandes masas y baja resistencia, son particularmente peligrosos durante los grandes terremotos, al menos en ausencia de otros factores.

Estos registros se denominan de campo cercano, ya que el estudio se realiza en la región epicentral, en la que los movimientos en superficie al paso de las ondas sísmicas son más intensos (movimientos fuertes del suelo), produciéndose desplazamientos, velocidades y aceleraciones elevadas, aunque dependiendo fundamentalmente de la magnitud del sismo y de su distancia, al epicentro.

Para obtener una determinación lo más exacta posible de los valores de aceleración que se han producido durante el terremoto en el lugar del registro, es necesario hacer un cuidadoso tratamiento de los registros. Puesto que los datos que se recogen de los acelerógrafos están en un formato propio del registrador (binario), será necesario hacer una conversión de los mismos a formato ASCII con el que, generalmente trabajaremos.

El acelerograma obtenido, presenta una serie de errores que deberán ser corregidos para que dicho registro sea apto para ser utilizado. En la Figura 2 presentamos el registro en sus tres componentes, sin corregir, de un sismo de magnitud 4.3.

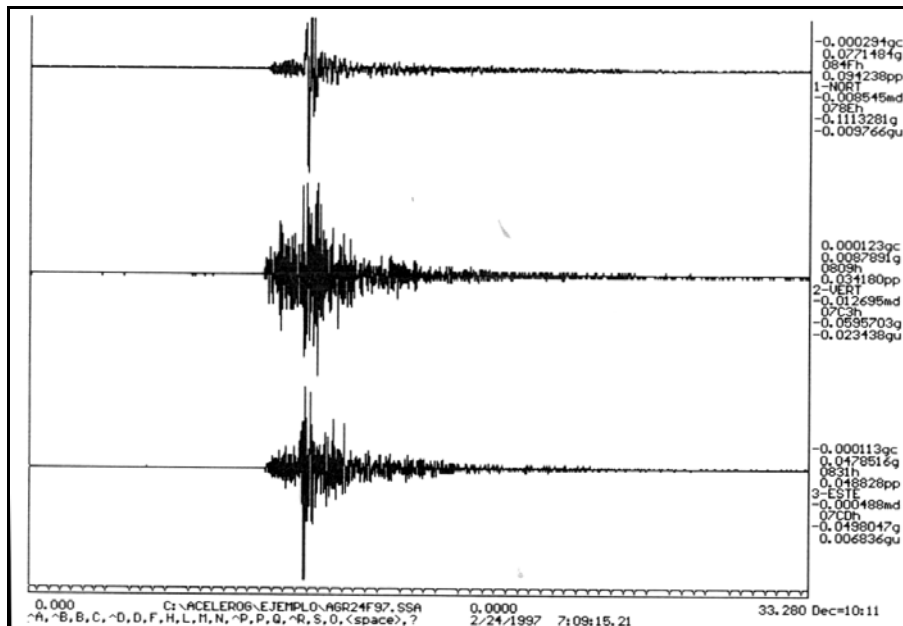


Figura 2 Acelerograma del terremoto de Ventas de Huelma (GR) (24/02/97) con mb = 4.3 en el acelerógrafo de Agrón (GR). Arriba componente N-S, centro: Componente Vertical y Abajo: Componente E-W.

2.1 Correcciones sobre los acelerogramas

Corrección Instrumental: Consiste en la convolución del registro con la función de

Anexo VI

Prácticas de “Sismología e Ingeniería Sísmica”

transferencia del instrumento. Para ello, debemos conocer las constantes de calibración del instrumento, como son la sensibilidad del acelerómetro, la frecuencia natural ω_n , y el amortiguamiento ξ , obteniéndose así un acelerograma corregido.

Corrección de la línea base o corrección de ceros: A veces, ocurre que los valores del acelerograma se encuentran desplazados respecto a la línea cero de aceleración. Este error puede ocurrir porque el acelerógrafo no esté perfectamente nivelado en su emplazamiento, o bien porque el sistema de registro provoque una deriva de los datos respecto a la línea de base. Aunque este error puede ser inapreciable en aceleración, puede ser muy importante cuando se obtienen la velocidad y el desplazamiento por integración, ya que estamos contabilizando el área que hay entre la curva de aceleración y la línea de base.

2.2 Filtrado del ruido

Una vez que el acelerograma ha sido corregido tanto de línea base como de corrección instrumental, habrá que tener en cuenta la repercusión que el ruido tiene sobre el acelerograma. Este ruido puede estar causado tanto por fenómenos naturales como por el tratamiento de los datos. Así podremos considerar que el acelerograma es la suma de la señal sísmica más el ruido,

$$a(t) = s(t) + r(t)$$

siendo $a(t)$ el acelerograma sin corregir, $s(t)$ la señal sísmica y $r(t)$ el ruido. El ruido que afecta al acelerograma (Figura 3), puede ser de dos tipos:

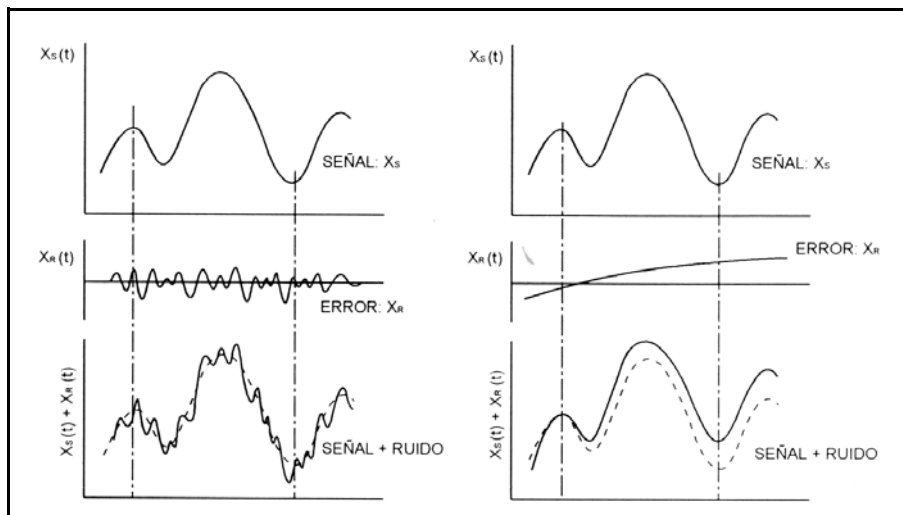


Figura 3 Izqda: Efecto del ruido de alta frecuencia; Dcha: Efecto del ruido de baja frecuencia.

Práctica 5.

Tratamiento de acelerogramas

a) *Ruido de alta frecuencia*: Cuando aparece por encima de la banda de frecuencias en la que trabajamos. Este ruido afecta fundamentalmente a los picos de aceleración. Sin embargo, no afecta mucho en el proceso de integración, ya que el área bajo la curva es prácticamente la misma que para la señal corregida, dado que las desviaciones por encima y por debajo se compensan.

b) *Ruido de baja frecuencia*: Cuando aparece por debajo de la banda de frecuencias en la que trabajamos. Afecta al proceso de integración básicamente, ya que al integrar la aceleración para obtener velocidad y desplazamiento, estamos obteniendo el área bajo la curva.

Puesto que no queremos que estos errores nos afecten, limitaremos la información a la banda de frecuencias deseada, en lugar de mantener información adicional a mayores y menores frecuencias, que pueden contener gran número de errores. Para hacerlo, se utilizan los filtros *pasa baja* para eliminar altas frecuencias, y los *pasa alta* para eliminar las bajas. Los filtros *pasa banda*, eliminan el ruido de alta y baja frecuencia simultáneamente.

Lo más importante a la hora de aplicar los filtros, es elegir la frecuencia de corte adecuada, ya que una mala elección puede suponer eliminar parte de la señal que nos interesa, o por el contrario, no eliminar el ruido de la señal.

El filtrado de la señal se hace multiplicando el espectro del acelerograma por una función que reduzca el valor de la amplitud del espectro de Fourier fuera de la banda donde están contenidas las frecuencias importantes de nuestra señal. En esa banda, el filtro deja las amplitudes inalterables.

En la práctica los filtros ideales no se pueden utilizar porque su función de transferencia en el tiempo es de longitud infinita. Sin embargo, se utilizan aproximaciones a ellos.

El programa Detra2000 permite usar los siguiente filtros:

a) *Pasa baja* hasta la frecuencia máxima F_{\max} :

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{F_{\max}}\right)^{2N}}}$$

Anexo VI
Prácticas de “Sismología e Ingeniería Sísmica”

b) *Pasa alta* desde la frecuencia mínima F_{\min} :

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{\min}}{f}\right)^{2N}}}$$

c) *Pasa banda* entre las frecuencias mínima y máxima:

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f^2 - F_{\min} F_{\max}}{f(F_{\max} - F_{\min})}\right)^{2N}}}$$

d) *Band Stop* entre las frecuencias mínima y máxima

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{F_{\min}}\right)^{2N}}} + \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{\max}}{f}\right)^{2N}}}$$

e) *Gaussiano* entre las frecuencias mínima y máxima

$$H(f) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{f - f_c}{S}\right)^2\right]; \quad \text{con} \quad f_c = \frac{F_{\min} + F_{\max}}{2}; \quad S = |f_c - F_{\min}|$$

f) *Futterman* con parámetro t^*

$$H(f) = \exp(-\pi f t^*) \exp(2i t^* \log \frac{f}{f_c})$$

donde f_c es la frecuencia de Nyquist, dada por: $f_c = 1 / 2\Delta t$

Este filtro es un filtro complejo por lo que también afecta a la fase de la señal.

2.3 Integración de acelerogramas

Una vez que el registro temporal de aceleración ha sido convenientemente corregido para su posterior utilización, es preciso integrarlo para obtener los registros de velocidad y desplazamiento (Figura 4). Si consideramos el dominio del tiempo, la integración se hace por métodos numéricos, teniendo en cuenta que:

Práctica 5.

Tratamiento de acelerogramas

$$\vec{v} = \int_0^t \vec{a} \cdot dt + \vec{v}_0$$

$$\vec{r} = \int_{t_0}^t \vec{v} \cdot dt + \vec{r}_0$$

Cada integración suaviza los componentes más altos del movimiento de las ondas, por lo que los registros de velocidad y desplazamiento son más simples y permiten una interpolación directa de los patrones de las ondas. Así, los impulsos de los primeros movimientos mayores de la onda S aparecen de forma inequívoca en los registros de velocidad, mientras que en los registros de desplazamiento se puede apreciar la presencia de un impulso de largo periodo asociado con el paso de la dislocación cerca del emplazamiento.

El pico de máxima velocidad nos da una clara medida del contenido de frecuencias intermedias del terremoto. Los picos de desplazamiento, muestran las características de largo período del movimiento. Por tanto, con los tres valores pico (de aceleración, velocidad y desplazamiento), tenemos una importante descripción del movimiento del suelo, mostrando cada uno una región diferente del espectro de frecuencias.

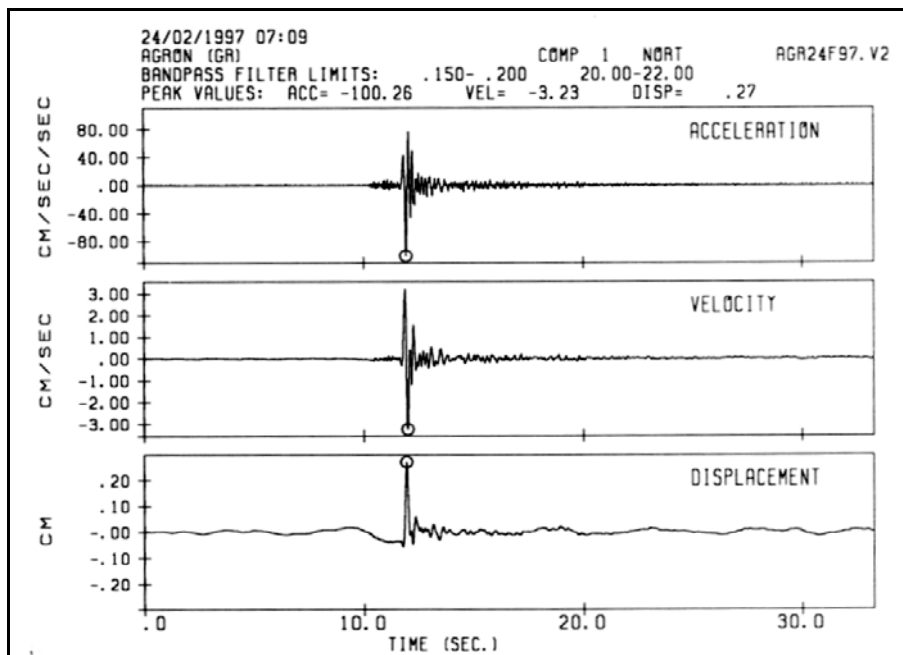


Figura 4 Aceleración, velocidad y desplazamiento, obtenidos a partir del acelerograma registrado en Agrón (24/02/97), mb = 4.3.

En el dominio de la frecuencia, la integración se reduce a dividir la aceleración por $-i\omega$ para hallar la velocidad y por ω^2 para hallar el desplazamiento:

Anexo VI

Prácticas de “Sismología e Ingeniería Sísmica”

$$L[a(t)] = A(\omega) e^{i\phi(\omega)}$$

$$L[v(t)] = \frac{1}{i\omega} A(\omega) e^{i\phi(\omega)}$$

$$L[d(t)] = -\frac{1}{\omega^2} A(\omega) e^{i\phi(\omega)}$$

donde $L [\]$ indica transformada de Fourier.

2.5 Análisis frecuencial

Una vez que se han obtenido los registros de velocidad y desplazamiento, es necesario hacer un análisis del contenido en frecuencias del acelerograma. Para ello, se utilizan el espectro de Fourier y el espectro de respuesta.

Espectro de Fourier

El espectro de Fourier es un parámetro que nos proporciona un amplio conocimiento acerca de cual es el contenido en frecuencias del acelerograma, de modo que para cada periodo de oscilación del acelerograma se representa la amplitud máxima que le corresponde (Figura 5).

Matemáticamente, el espectro de Fourier en amplitudes se define como:

$$FS = \sqrt{\left[\int_0^t a(\tau) \cos(\omega \tau) d\tau \right]^2 + \left[\int_0^t a(\tau) \sin(\omega \tau) d\tau \right]^2}$$

De la interpretación del espectro de Fourier, podemos deducir cuales son los periodos más importantes del terremoto (que son los que lo van a caracterizar), sin más que buscar en qué lugares se alcanzan los picos de amplitud. Además, podemos ver cual es la frecuencia o periodo predominante de un registro, que es aquel para el cual el espectro de Fourier de la aceleración alcanza su valor máximo, y que además mantiene una correlación directa con la distancia epicentral. Se suele representar con ejes logarítmicos, de modo que en el eje de abscisas se colocan los distintos periodos de oscilación, y en el eje de ordenadas se representan las amplitudes en cm/s.

Espectro de Respuesta

El espectro de respuesta de un acelerograma, representa la respuesta máxima de un oscilador de un sólo grado de libertad y de masa unitaria, con frecuencia ω_0 y amortiguamiento ξ , cuando se le somete a un movimiento del suelo dado por dicho

Práctica 5. Tratamiento de acelerogramas

acelerograma (Figura 6).

Se suelen considerar distintos periodos propios del oscilador y distintos valores de amortiguamiento de modo que para un periodo propio T y un amortiguamiento ξ del oscilador, el acelerograma provoca un movimiento cuyos picos de aceleración, velocidad y desplazamiento se recogen en el espectro de respuesta.

La solución de las vibraciones estacionarias de un sistema de un grado de libertad, viene dada por la integral de Duhamel, donde $x(t)$ es función de ξ , ω y $a(t)$:

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_{\xi}} \int_0^t a(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin[\omega_{\xi}(t-\tau)] d\tau$$

donde:

$$\omega_{\xi} = \omega \sqrt{1 - \xi^2}$$

que derivando nos da la historia de la respuesta en velocidades:

$$\dot{x}(t) = -\int_0^t a(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos[\omega_{\xi}(t-\tau)] d\tau - \xi\omega x(t)$$

y derivando de nuevo, se obtiene la respuesta en aceleraciones:

$$\ddot{x}(t) + a(t) = \left[\int_0^t a(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin[\omega_{\xi}(t-\tau)] d\tau - \xi\omega \right] - 2\xi\omega \dot{x}(t) - (\xi\omega)^2 x(t)$$

El espectro de respuesta en desplazamiento, velocidad o aceleración, será el conjunto de máximos valores de las respuestas del sistema:

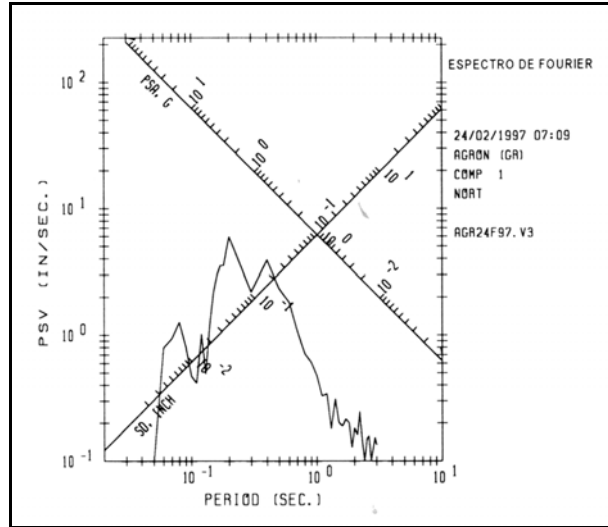


Figura 5 Espectro de Fourier del acelerograma registrado en Agrón (GR) el 24/02/97, mb=4.3.

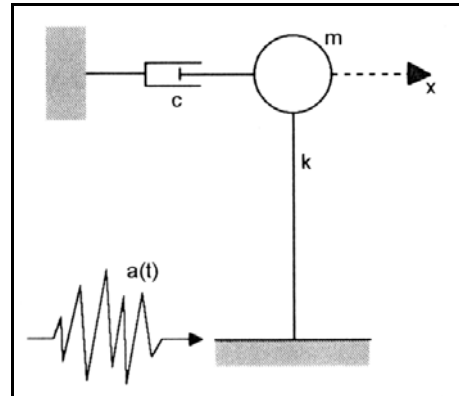


Figura 6 Modelo de un grado de libertad sometido a una excitación sísmica.

Anexo VI

Prácticas de “Sismología e Ingeniería Sísmica”

$$S_d^r(\omega, \xi) = |x(t)|_{\max}$$

$$S_v^r(\omega, \xi) = |\dot{x}(t)|_{\max}$$

$$S_a^r(\omega, \xi) = |\ddot{x}(t) + a(t)|_{\max}$$

donde S_d^r y S_v^r son los máximos de desplazamiento y velocidad relativos y S_a^r es el máximo de aceleración total del oscilador de un grado de libertad.

Puesto que estos valores requieren un largo proceso de cálculo, se han hecho simplificaciones para aligerarlo, obteniéndose los pseudoespectros de respuesta, que vienen dados por las siguientes expresiones:

$$S_d(\omega, \xi) = \left| -\frac{1}{\omega_\xi} \int_0^t a(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \text{sen}[\omega_\xi(t-\tau)] d\tau \right|_{\max}$$

$$S_v(\omega, \xi) = \left| -\int_0^t a(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \text{sen}[\omega_\xi(t-\tau)] d\tau \right|_{\max}$$

$$S_a(\omega, \xi) = \left| \omega_\xi \int_0^t a(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \text{sen}[\omega_\xi(t-\tau)] d\tau \right|_{\max}$$

Como se puede ver, sin más que calcular S_d , podemos obtener S_v y S_a , ya que:

$$S_v = \omega_\xi S_d$$

$$S_a = \omega_\xi^2 S_d$$

Tanto para calcular los espectros sísmicos de respuesta como los pseudoespectros sísmicos de respuesta es necesario realizar el cálculo numérico de la integral de Duhamel, haciéndose determinadas simplificaciones que dan una buena aproximación y reducen sensiblemente el coste numérico.

Una forma simple y elegante de representar el espectro de respuesta, es mediante un diagrama trilogarítmico de cuatro entradas en el que aparece el pseudoespectro de velocidad frente al periodo T o frecuencia ω , y en las líneas a 45° se representan los valores constantes de pseudoaceleración absoluta para pendiente 1, y desplazamientos constantes relativos para pendiente -1.

Además el espectro de respuesta se suele representar para distintos valores del amortiguamiento (Figura 7).

No obstante, a veces es conveniente representar con ejes reales y por separado, los

Práctica 5. Tratamiento de acelerogramas

distintos espectros de aceleración, velocidad o desplazamiento, y hacerlo para aquellos valores de amortiguamiento que se consideran necesarios (Figura 8).

También se utilizan mucho los gráficos normalizados, en los que se divide el valor del pseudoespectro de aceleración por el valor pico de aceleración en el origen, ya que estos gráficos normalizados son los que se comparan con la norma sismorresistente de construcción (Figura 9).

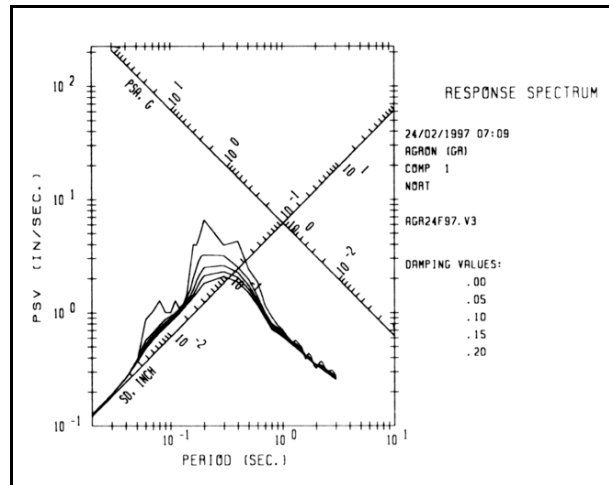


Figura 7 Espectro de respuesta del acelerograma registrado en Agrón (GR) el 24/02/97, mb = 4.3

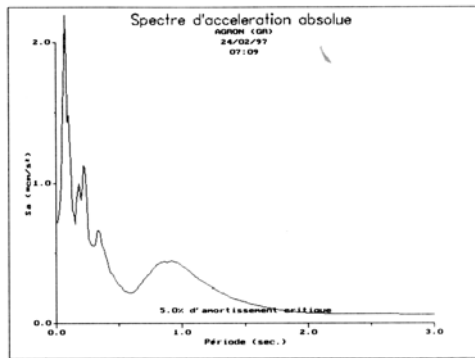


Figura 8 Espectro de aceleración para un amortiguamiento del 5% correspondiente al acelerograma registrado en Agrón (GR) el 24/02/97, mb=4.3

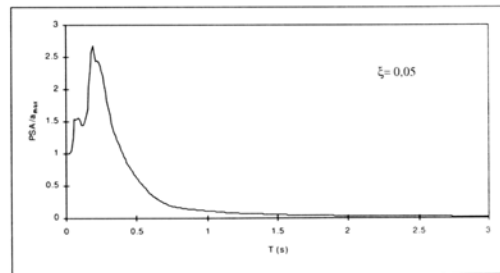


Figura 9 Espectro de respuesta en aceleración para un amortiguamiento del 5% correspondiente al acelerograma registrado en Agrón (GR) el 24/02/97, mb=4.3

2.6 Otros parámetros de interés en ingeniería

Duración significativa. Gráficos de Husid

El concepto de duración significativa nos relaciona la duración con la fase de máxima energía del movimiento, y queda representado por el tiempo transcurrido entre los instantes en los que se alcanza el 5% y el 95% del valor de la intensidad de Arias.

La intensidad de Arias es una medida de la energía del terremoto y se define según la integral siguiente:

Anexo VI

Prácticas de “Sismología e Ingeniería Sísmica”

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a^2(t) dt$$

siendo $a(t)$ la historia temporal de aceleración, y t_f el tiempo total del registro.

Por tanto, si calculamos la intensidad de Arias, y hallamos para que instantes se alcanzan el 5% y el 95% de su valor, la diferencia entre los mismos nos dará la duración significativa.

Para ver gráficamente su significado (Figura 8), se utilizan los gráficos de Husid, que nos muestran la variación de la intensidad de Arias frente al tiempo. Es un gráfico de valores acumulados que define la evolución del movimiento del suelo en el emplazamiento del acelerógrafo.

El gráfico se representa normalizado, es decir, colocando en el eje de abscisas los valores del tiempo transcurrido en segundos, y en el eje de ordenadas los valores acumulativos que representa el cociente:

$$\frac{I_t}{I_A} = \frac{\frac{\pi}{2g} \int_0^t a^2(t) dt}{\frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt}$$

Intensidad Espectral o Intensidad de Housner

Puesto que el espectro de respuesta define los valores máximos de la respuesta sísmica de estructuras de un grado de libertad para un determinado rango de periodos, se puede deducir que el área bajo el espectro entre dos periodos cualesquiera constituye una medida de la respuesta media de las estructuras en ese rango de periodos.

Por eso, Housner definió una medida de la energía local del movimiento que provoca un terremoto, a la que llamó **intensidad espectral**.

Los límites de integración y el valor de ξ se eligen de forma que incluyan el rango de periodos más habitual en el diseño sismorresistente de las estructuras de edificación, por lo que son normales los valores de 0.1 y 2.5 s, como límites de integración, y un valor de ξ entre 0.05 y 0.2.

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi) dT$$

Práctica 5.

Tratamiento de acelerogramas

siendo T el periodo del oscilador, S_v el espectro de pseudovelocidad, y ξ el coeficiente de amortiguamiento.

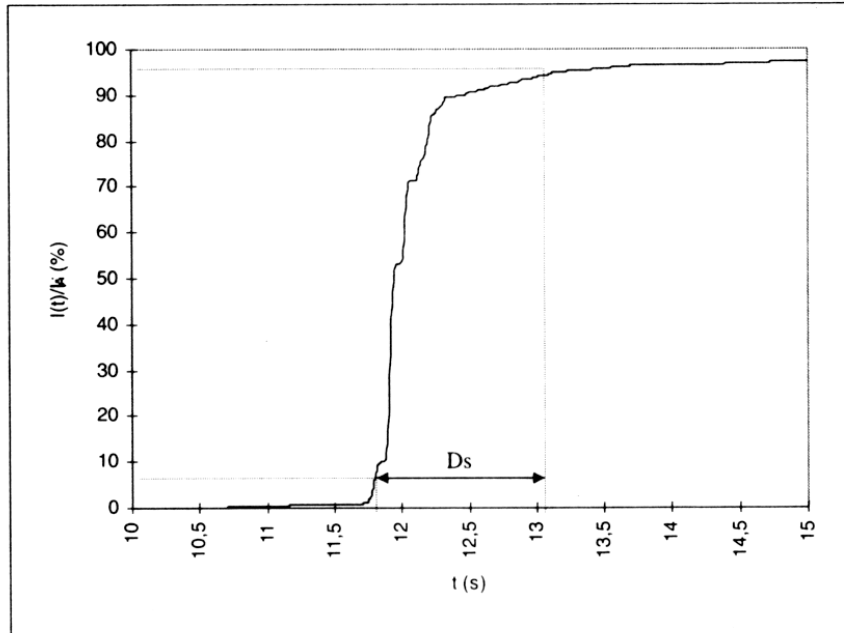


Figura 10 Gráfico de Husid y definición del concepto de duración significativa (D_s), correspondiente al acelerograma registrado en Agrón (GR) el 24/02/97, $m_b = 4.3$

Para la interpretación de la intensidad espectral o intensidad de Housner, hay que señalar que en el espectro de respuesta de cada periodo de vibración se puede asociar a una altura determinada de un edificio, por lo que podemos determinar que vibraciones pueden hacer entrar en resonancia a una estructura determinada. Por lo tanto, la intensidad de Housner se utiliza como un parámetro que mide el daño medio que sufren las estructuras.








Odograma

Gráfica que describe la trayectoria de la partícula considerando que la señal numerador define la coordenada en x , y la señal denominador define la coordenada en y .

3. METODOLOGÍA

1. Acceder a la base de datos de aceleración del Instituto Geográfico Nacional (CDROM) y extraer el fichero ASCII con el registro del terremoto con epicentro en Ventas de Huelma (GR) de $m_b = 4.3$ obtenido en el acelerógrafo de Agrón (GR), el 24/02/97.

Anexo VI
Prácticas de “Sismología e Ingeniería Sísmica”

2. Archivar la componente N-S en un fichero Ascii.
3. Crear un *M-script* que lea dicho fichero y lo escriba como una matriz en la que la columna *x* correspondan a los tiempos y la columna *y* corresponda a la aceleración registrada.
4. Representar dicha matriz en Matlab y comprobar si el acelerograma necesita corrección de línea base. Para ello obtén el valor medio y la desviación estándar de la columna correspondiente a la aceleración y comprueba que dicho valor sea prácticamente cero. En caso contrario necesitaremos efectuar dicha corrección bien en Matlab (Ejecutar *DETREND* (*y*) donde *y* es la columna correspondiente a la aceleración o bien en *DEGTRA* (‘Pulsando el botón  ’)).
5. Utilizar la herramienta filtrar de DEGTRA  para llevar a cabo un filtrado paso-banda con frecuencia mínima 0.150 Hz y frecuencia máxima 20 Hz. Archivar el resultado obtenido y compararlo con los que se obtendrían al aplicar los filtros restantes.
6. Obtén a partir del acelerograma una vez realizado el filtrado paso-banda y por integración  los registros correspondientes a velocidad y a desplazamiento. Archiva los datos correspondientes a cada registro y obtén en Matlab o en DEGTRA, un gráfico con los tres registros.
7. Obtén el espectro de Fourier  de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento para diferentes valores de factor de suavizado y compara los resultados obtenidos. Para el valor por defecto de suavizado, δ , representa en un diagrama trilogaritmico dichos espectros de Fourier.
8. Obtén el pseudoespectro de respuesta  de aceleración, velocidad y desplazamiento y representalos en un diagrama trilogaritmico.
9. Obtener la duración significativa y el gráfico de Husid .
10. Obtener la intensidad espectral o intensidad de Housner a partir de la ecuación propuesta en la teoría.
11. Obtener el Odograma  correspondiente al terremoto para las componentes N-S y Vertical.
11. Repetir los pasos anteriores para las componentes E-W y vertical del acelerograma.

Práctica 5.
Tratamiento de acelerogramas

12. Escoger el registro obtenido en una estación próxima cuyas características de suelo sean muy diferentes a la del emplazamiento de Agrón. Obtener los espectros de Fourier y de Respuesta y compararlos con los de la estación de Agrón.
13. Realiza un informe con todos los resultados obtenidos y comenta las conclusiones que se pueden extraer de cada uno de ellos.