

Generación numérica de acelerogramas compatibles con espectros de respuesta dados

FRANCISCO NAVARRO COLOM (*)

RESUMEN La integración en el dominio del tiempo de las ecuaciones de la dinámica de estructuras es un método imprescindible para determinados modelos de comportamiento estructural. Del mismo modo, la simulación en Laboratorio también exige la utilización de señales temporales de excitación de los modelos. Sin embargo, la mayoría de normas sísmicas definen la acción de cálculo por la aceleración máxima y el espectro de respuesta, lo que obliga a la generación numérica de acelerogramas compatibles con los valores marcados por las normas. Se consideran los acelerogramas como señales aleatorias estacionarias y no estacionarias, tanto en amplitud como en frecuencia y fase, describiendo algunos de los métodos más conocidos de generación por superposición de componentes armónicos, con corrección iterativa de los espectros resultantes. Finalmente, se indican algunas características a tener en cuenta en los acelerogramas generados, como son la corrección de la base de tiempos para la eliminación de componentes estáticas de aceleración; y los efectos sobre la fatiga a bajo número de ciclos que pueden tener diferentes funciones de modulación y distintas distribuciones de máximos en la respuesta a un acelerograma dado.

NUMERICAL GENERATION OF COMPATIBLE ACCELEROGRAMS WITH GIVEN RESPONSE SPECTRA

ABSTRACT An essential method to know certain structural behaviour models is the integration at the time axis of the structures dynamic equations. Likely, laboratory simulation also requires the use of temporary signals of excitation in models. However, most of the seismic codes establish the calculus action by the maximum acceleration and the response spectrum, making the accelerograms numerical generation compatible with the values fixed by the codes. The accelerograms are taken as random stationary and not stationary signals, as well as at the amplitude as at the frequency and phase, describing some of the more known methods of generation by superposition of harmonic components, with repeated correction of the resultant spectra. Finally, some of the characteristics taken into account about generated accelerograms are indicated, as the correction of the time base for the removal of the static components of the acceleration and effects over the low-cycles fatigue which may have different modulation functions and distributions of maxima as answer to a given accelerogram.

Palabras clave: Ingeniería Sísmica; Simulación; Comportamiento no lineal; Generación numérica de sismos; Acelerogramas compatibles.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno sísmico considerado como acción exterior dinámica en la Ingeniería Civil participa de las características extremas de otros fenómenos de la naturaleza: precipitaciones atmosféricas, avenidas fluviales, temperaturas, etc. Su carácter intrínsecamente aleatorio supone una incertidumbre inevitable a la hora de definir la acción de proyecto correspondiente. Por añadidura, es muy frecuente que el número de muestras sobre las que trabajar sea claramente insuficiente para obtener resultados justificados, dado que la recurrencia de los movimientos sísmicos supone un lapso de tiempo superior a las técnicas de medición en marcha, especialmente para movimientos fuertes.

La definición del sismo normalmente se realiza mediante dos conceptos principales: aceleración máxima y característica frecuencial del movimiento. Para ésta última se han utilizado dos funciones: la función de densidad espectral de potencia, en el caso de aproximar el movimiento como un fenómeno aleatorio estacionario, y el espectro elástico de respuesta, si optamos por considerarlo un transitorio. La mayoría de la normativa moderna sobre la acción sísmica define el espectro de respuesta de cada hipótesis de carga, caracterizando implícitamente el sismo como un proceso transitorio en amplitud. De esta forma, es posible resolver la estructura correspondiente a partir de sus características dinámicas (frecuencias y formas modales), por un método de superposición modal en el supuesto de respuesta lineal de la misma; evitando la utilización de señales en el dominio del tiempo, y, por tanto, su definición.

Sin embargo, existen casos en que es necesaria la utilización de una ley temporal de aceleraciones. Obviamente,

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (MOPTMA).

siempre que se quiera resolver por un proceso paso a paso en el dominio del tiempo (justificado por acoplamientos modales, por ejemplo); pero también siempre que el procedimiento de superposición sea inaplicable: por no linealidad del sistema, en la mayoría de los casos. Asimismo, la experimentación en modelo, tanto por simulación sísmica en mesa vibrante como por ensayo pseudodinámico, necesita la definición de la acción sísmica por una ley de aceleraciones en función del tiempo. En cualquier caso, si se pretende ser coherente con la normativa es imprescindible utilizar uno o varios acelerogramas cuyo espectro de respuesta, para el amortiguamiento indicado por la norma, sea compatible con el espectro de diseño y la aceleración máxima correspondiente, de acuerdo con el tipo y utilización de la estructura en cuestión, y el emplazamiento de que se trate.

SEÑALES ESTACIONARIAS

La primera aproximación al comportamiento real de la aceleración en sismos es la de señales aleatorias estacionarias tanto en amplitud como en fase. Las características dinámicas del movimiento quedan entonces determinadas por la función de densidad espectral de potencia, $S(\omega)$, definida como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación, y, por lo tanto, función de la frecuencia de las componentes armónicas del movimiento. Si se considera el desarrollo en serie de cosenos del acelerograma, tenemos:

$$x''(t) = \sum A_i \cos(\omega_i t + \theta_i)$$

Si suponemos una separación de frecuencias constante, $\Delta\omega$, las amplitudes A_i en un acelerograma aleatorio estacionario pueden expresarse como:

$$A_i = (2S(\omega_i)\Delta\omega)^{1/2}$$

La forma más habitual de considerar la densidad espectral es por valores discretos para incrementos frecuenciales constantes. Para un proceso de cálculo eficaz, es conveniente utilizar el mismo incremento en la fórmula de las amplitudes armónicas. De todas formas, si interesa incluir un armónico a una frecuencia fija, siempre es posible interpolar en los valores de la densidad espectral. Los va-

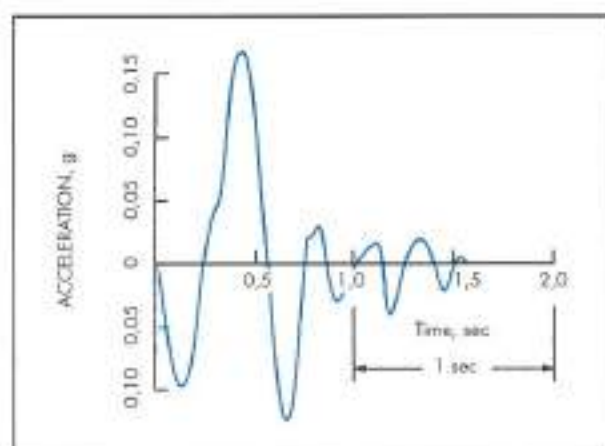


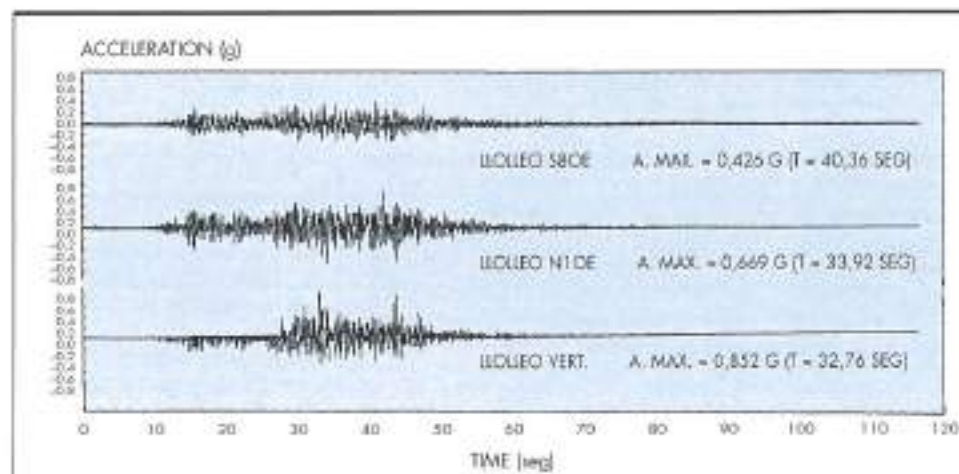
FIGURA 1. Componente N-S del terremoto de Port Huanema (18 de Marzo de 1957).

lores de los desfases, θ_i , se obtienen aleatoriamente en el intervalo $(0, 2\pi)$. Variando estos desfases aleatorios, se obtienen diferentes acelerogramas con la misma densidad espectral.

Las señales aleatorias estacionarias se consideran, por definición, indefinidas en duración, siendo su función de densidad espectral independiente de la muestra temporal considerada (procesos ergódicos). Los acelerogramas reales tienen evidentemente una longitud finita, muy variable para cada tipo de terremoto. El efecto que este recorte de duración tiene sobre la función de densidad de potencia depende de la frecuencia, siendo más importante cuanto más baja. En general, se recomienda una duración mínima del registro sintético de 10 veces el período más alto del intervalo frecuencial considerado. En las figuras 1 y 2 se muestran dos ejemplos de sismos reales de duraciones muy distintas.

En el proceso anterior no se ha considerado el valor de la aceleración pico en el cálculo del acelerograma. Dicha aceleración es un valor máximo, que responde a una distribución extremal, normalmente una distribución de Gumbel. De acuerdo con dicha ley estadística, existe una relación entre la probabilidad de una aceleración pico determinada y los

FIGURA 2. Registros de aceleración del terremoto de Chile, de 3 de Marzo de 1985, en la estación de Ualeo. La máxima aceleración pico (0,85 g) corresponde a la componente vertical.



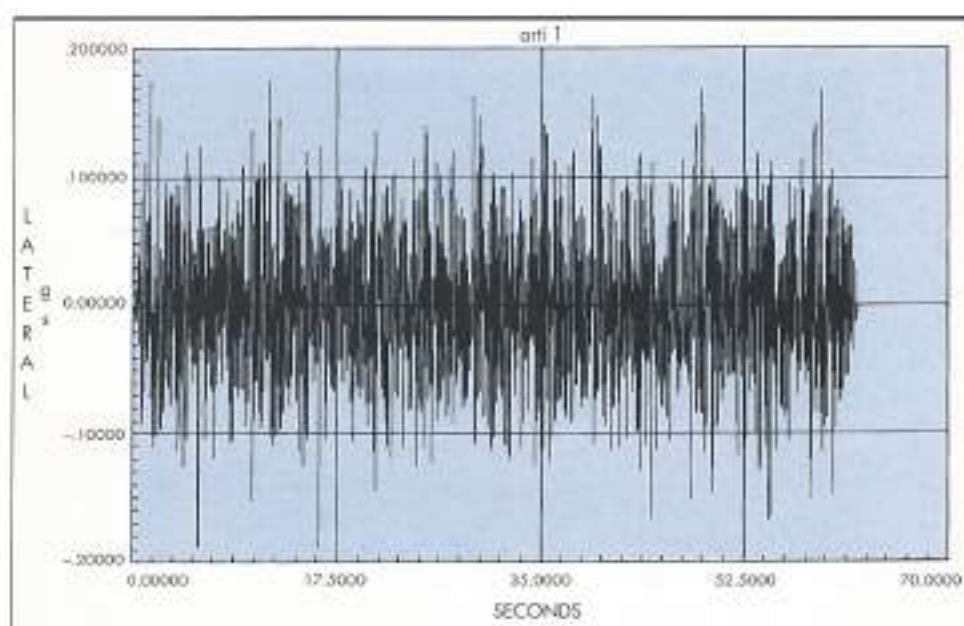


FIGURA 3. Acelerograma estacionario en amplitud y frecuencia, de 60 segundos de duración, compatible con la función de densidad espectral de potencia de la figura 5 c.

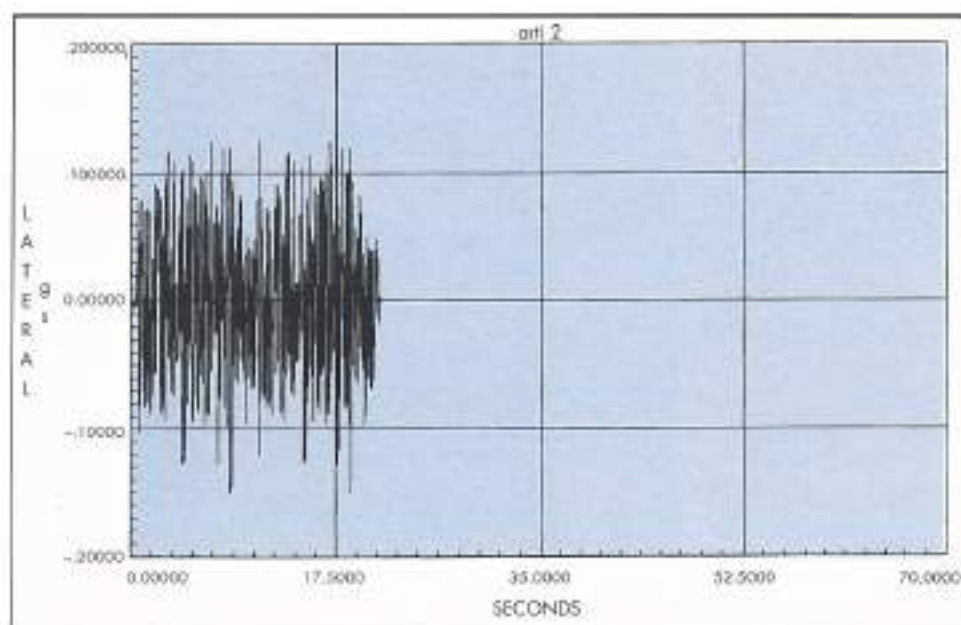


FIGURA 4. Acelerograma estacionario en amplitud y frecuencia, de 20 segundos de duración, compatible con la función de densidad de la figura 5 c.

valores de la densidad espectral de dicha señal. Para un acelerograma de duración limitada, el valor máximo de la aceleración será una aproximación al predicho, pudiéndose incrementar la exactitud con nuevos valores del desfase, o modificando la aceleración pico y comprobando su efecto en la función de densidad espectral. En las figuras 3, 4 y 5 se incluyen dos acelerogramas generados de dos duraciones distintas, y la aproximación de ambos a la densidad espectral deseada.

SEÑALES NO ESTACIONARIAS

Los terremotos reales se caracterizan por presentar una fase máxima del movimiento (paroxismo) claramente identificada, a partir de la cual la aceleración se atenúa hasta anu-

larse (con posibles máximos secundarios). Dicho comportamiento dista de corresponder a señales aleatorias estacionarias, siendo más correcto compararlos a transitorios de mayor o menor duración. De este modo, aunque sigue existiendo una función de densidad espectral de potencia de acuerdo con la definición dada, dicha función no representa todas las características dinámicas de la señal, y, en particular, no es adecuada para obtener las características del movimiento de una estructura sometida a la acción de la aceleración correspondiente.

Para ello debe utilizarse la función de respuesta en frecuencia, definida como la respuesta máxima de un oscilador lineal de frecuencia natural ω , sometido a la señal temporal en cuestión. Dicha función, $E(\omega, \eta)$, dependerá del amortiguamiento que se considere en cada oscilador lineal. Se

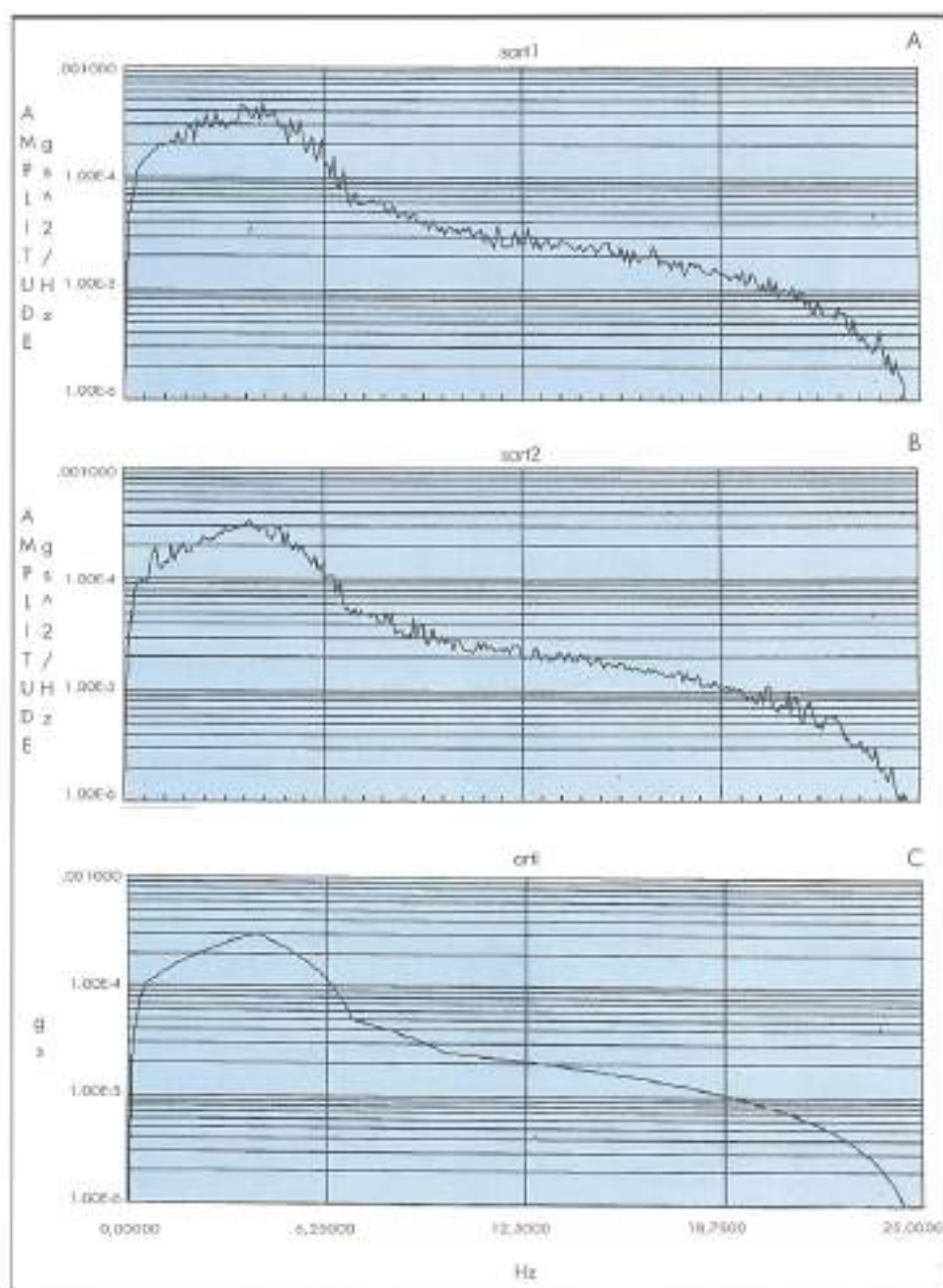


FIGURA 5. Funciones de densidad espectral de potencia de los acelerogramas de las figuras 3 y 4, y función de densidad compatible

puede entonces calcular la respuesta de cualquier sistema lineal sometido a esa acción por un proceso de superposición modal espectral, a partir de los valores del espectro de respuesta para las frecuencias modales del sistema, aunque la acción temporal correspondiente sea un transitorio.

La mayoría de las normas sísmicas actuales, entre ellas la nueva norma española en vigor, utilizan el espectro de respuesta para caracterizar las características frecuenciales del sismo de diseño. Los valores del espectro de cálculo dependen del tipo de suelo de cimentación y del emplazamiento de la obra.

El método para obtener acelerogramas transitorios compatibles con un espectro de respuesta dado parte de suponer dicho acelerograma estacionario. Basándose en la distribu-

ción de máximos de aceleración, obtenemos la función de densidad espectral de potencia a partir del espectro de respuesta (ya que este es una función de máximos). Por el método anterior se pueden definir las amplitudes de los armónicos considerados en la generación del movimiento a partir de la densidad espectral, y la variación temporal envolvente se consigue mediante una función de modulación temporal, $m(t)$, de acuerdo con la duración total y el aspecto deseado en el sismo generado. Aunque se han utilizado varios tipos de funciones de modulación (trapezoidal, exponencial, compuesta, etc.), una de las más utilizadas es la propuesta por Housner (Fig. 6).

De acuerdo con lo anterior, tendremos un acelerograma cuyo desarrollo en serie de cosenos será:

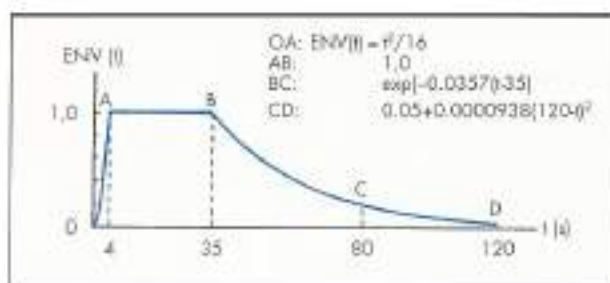


FIGURA 6. Función de modulación temporal de aceleración (Housner, 1964).

$$x'' = m(t) \cdot \sum A_i \cos(\omega_i t + \theta_i)$$

Este acelerograma tendrá un espectro de respuesta sólo aproximado al espectro deseado. Si llamamos $E(\omega, \eta)_1$ y $E(\omega, \eta)$ a ambos espectros, se puede entonces definir un proceso iterativo de corrección de la función de densidad de potencia, de acuerdo con el algoritmo:

$$S(\omega)_{i+1} = S(\omega)_i \cdot \frac{E(\omega, \eta)}{E(\omega, \eta)_1}$$

Con la nueva densidad de potencia se obtienen las amplitudes corregidas y el nuevo acelerograma, más compatible con el espectro de respuesta inicial. Puede obtenerse un ahorro en tiempo de cálculo evitando el proceso de iteración en la función de densidad espectral, y corrigiendo directamente las amplitudes armónicas de acuerdo con:

$$A_{i+1} = A_i \cdot \frac{E(\omega, \eta)}{E(\omega, \eta)_1}$$

La ley de recurrencia anterior presupone que cada componente armónica influye en el espectro de respuesta únicamente en su misma frecuencia, lo que no es cierto, especialmente para amortiguamientos altos. Algunos métodos de generación modifican la ley anterior introduciendo también la relación entre espectros de respuesta para frecuencias vecinas, afectada con valores de ponderación adecuados.

La aceleración pico, como en el caso de señales estacionarias, no es independiente de los valores del espectro de respuesta de cálculo. Además en este caso se muestra muy sensible a la forma de la función de modulación utilizada en la definición de la señal transitoria, especialmente a la duración de la meseta de máxima aceleración. Variando esta función, pueden obtenerse dentro de ciertos límites, las aceleraciones pico deseadas. Los desfases de los componentes armónicos de un acelerograma dependen de muchos factores que los hacen prácticamente aleatorios para frecuencias altas; no es así para frecuencias bajas, y teóricamente, el desfase es siempre nulo para la frecuencia cero. Normalmente se utilizan desfases aleatorios, θ_i , aunque es más correcto permitir la posibilidad de una ley de desfases previa, e, incluso, la superposición de una ley fija y una oscilación aleatoria. Las figuras 7, 8 y 9 muestran dos acelerogramas compatibles con el mismo espectro de respuesta, para dos funciones de modulación distintas, y un amortiguamiento 5 % del crítico.

SEÑALES NO ESTACIONARIAS EN FRECUENCIA

Los sismos registrados en la naturaleza, al menos los de duración apreciable, presentan una dispersión en el tiempo del contenido frecuencial, de acuerdo con las características de los distintos tipos de ondas de tensión al transmitirse por el terreno. Normalmente, las bajas frecuencias se refuerzan en la parte final del acelerograma. El método descrito de generación temporal da lugar a acelerogramas con un contenido frecuencial uniforme en toda la duración del sismo; para tener en cuenta este fenómeno pueden utilizarse dos vías:

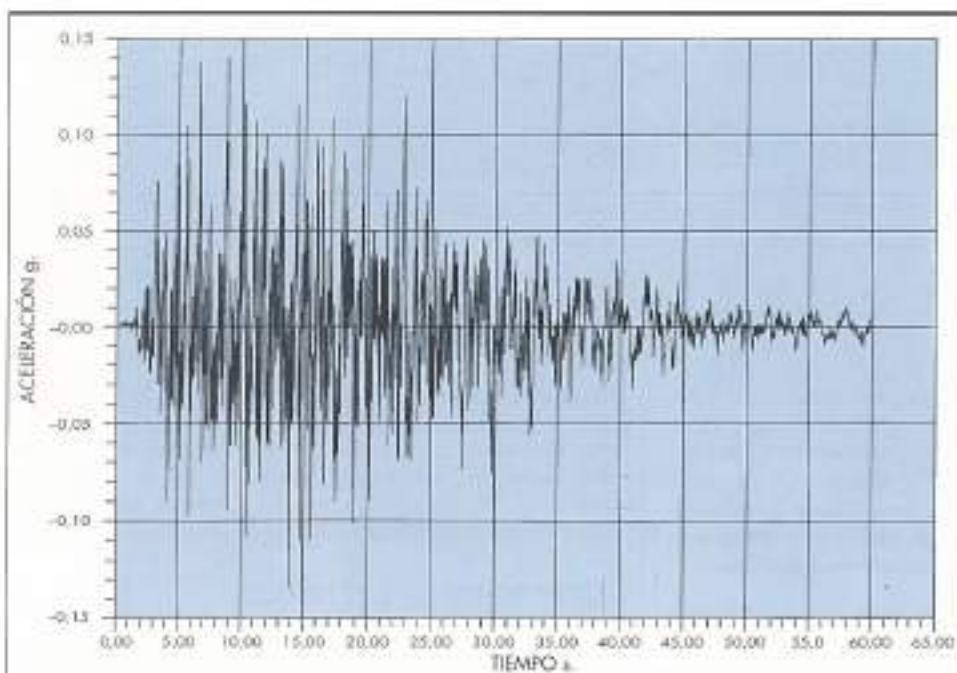


FIGURA 7. Acelerograma compatible con el espectro elástico de respuesta de la figura 9, para una duración de amplitudes máximas de 20 segundos.

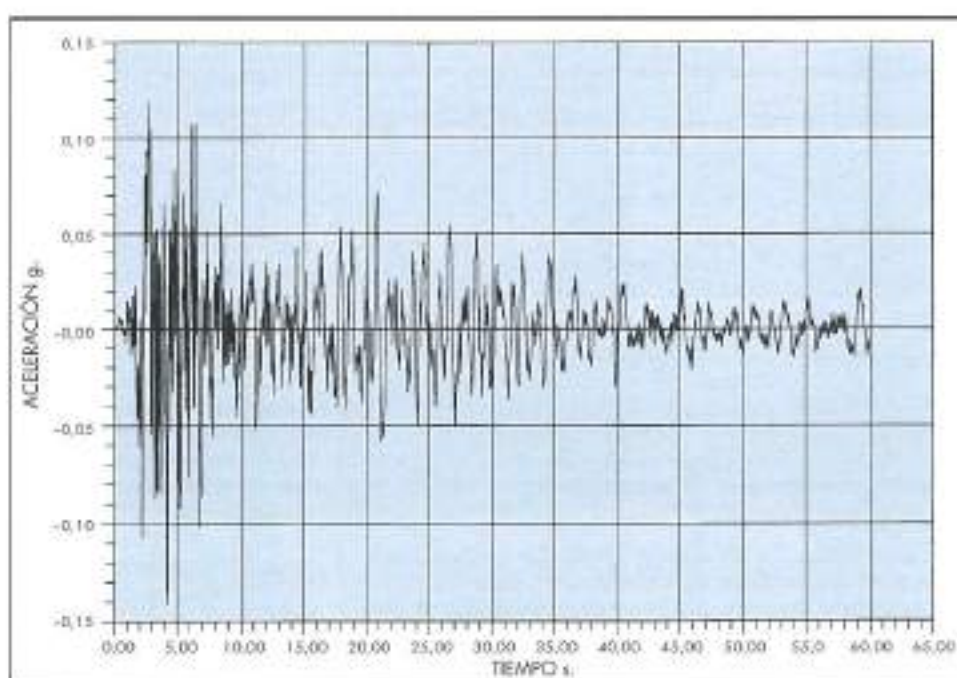


FIGURA 8. Acelerograma compatible con el espectro elástico de respuesta de la figura 9, para una duración de amplitudes máximas de 6 segundos.

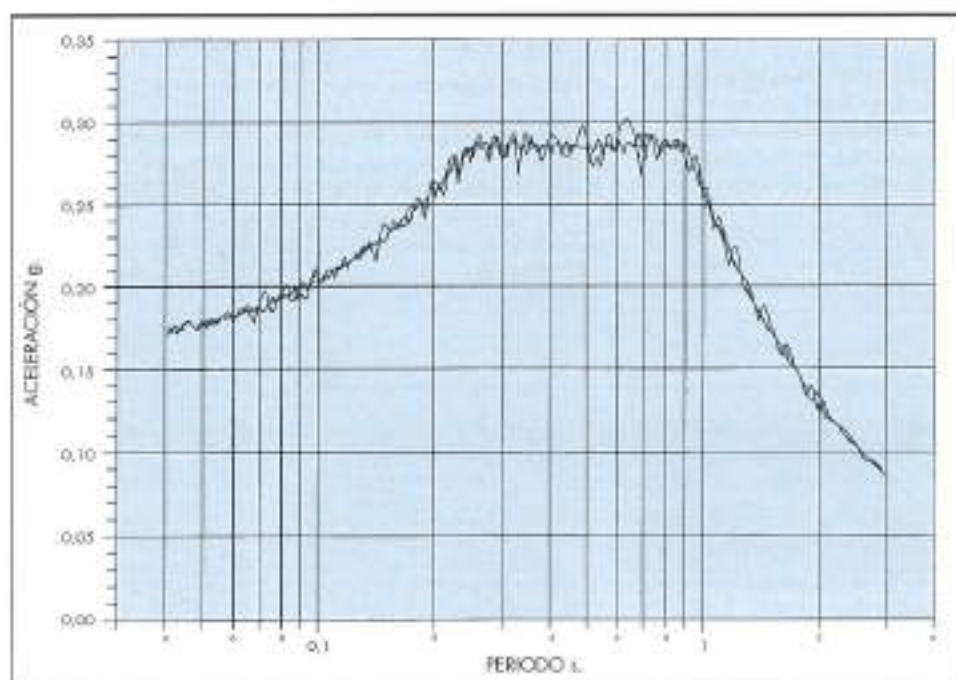


FIGURA 9. Espectros elásticos de respuesta de los acelerogramas de las figuras 7 y 8, para el 5% de amortiguamiento y 300 líneas de frecuencia.

- Definición de una función de densidad espectral evolucionaria en el tiempo (Priestley, 1967), lo que da lugar a una serie de funciones de modulación variables en el tiempo, que se definen a partir de registros reales.
- Utilización directa de diferentes funciones de modulación para cada frecuencia armónica, reforzando empíricamente las bajas frecuencias al final del acelerograma.

La dispersión de las frecuencias armónicas en el tiempo es una "firma" de la transmisión del sismo desde su mecanismo focal al lugar de registro correspondiente. Para la de-

finición de un sismo de diseño, no parece muy lógico adoptar una dispersión determinista que, en el mejor de los casos, sólo sería válida para un foco y una trayectoria de ondas determinadas. Sin embargo, sí puede ser útil en estudios de detalle de emplazamientos, y fallas puntuales bien localizadas, existiendo registros previos en los que apoyarse.

CORRECCIÓN DE BASE DE TIEMPOS

La superposición de componentes armónicas asegura, para frecuencias altas, la anulación del valor medio de la acelera-

ción en todo el dominio de tiempo. No ocurre lo mismo con las componentes de baja frecuencia, que dan lugar a una componente estática de la aceleración, que se manifiesta especialmente al obtener el desplazamiento por integración doble de la aceleración. Es conveniente anular dicha componente estática en los cálculos por modelo numérico, para evitar desplazamientos finales exagerados; y es imprescindible hacerlo si se utiliza el acelerograma sintético en ensayos de laboratorio, comprobando que los desplazamientos finales obtenidos son compatibles con los equipos existentes.

Existen varias técnicas de filtrado para eliminar la com-

ponente estática: filtrado por medias móviles, en el que es posible fijar la frecuencia de corte por el tamaño de muestra móvil utilizado; filtros numéricos clásicos de rechazo de frecuencias inferiores, con frecuencias de corte adecuadas; etc. Un método utilizado frecuentemente es superponer una ley parabólica de aceleración en el tiempo, con las condiciones de anulación final de velocidad y desplazamiento.

Cualquiera que sea el método utilizado, el proceso de ajuste modifica el espectro de respuesta en las bajas frecuencias, por lo que es conveniente integrar las técnicas de filtrado en el algoritmo de iteración.

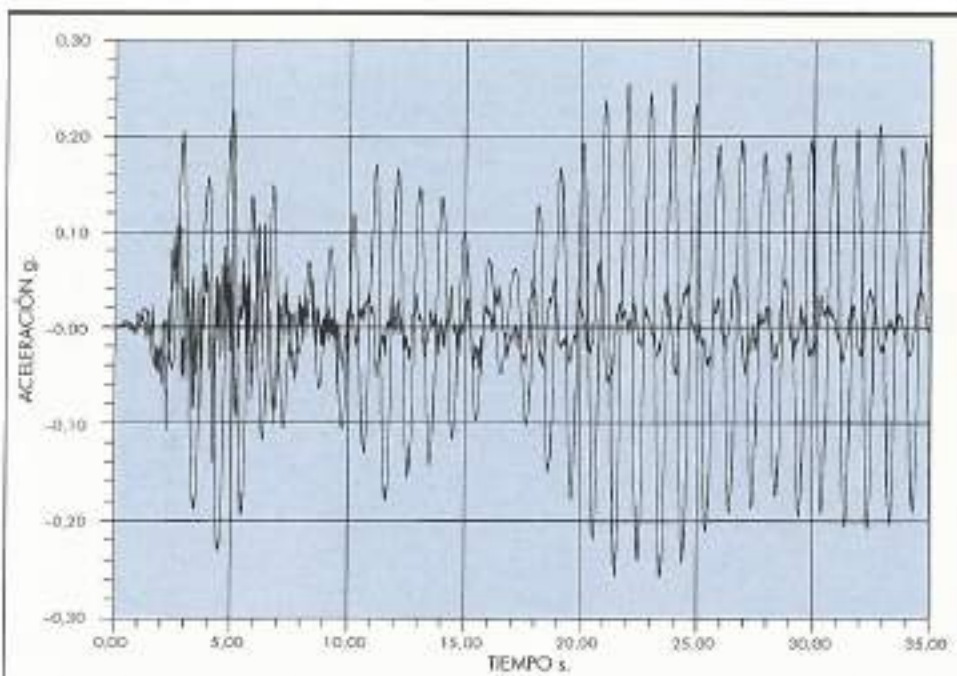


FIGURA 10. Respuesta de un oscilador lineal de 1 Hz de frecuencia natural y 5% de amortiguamiento al acelerograma de la figura 8.

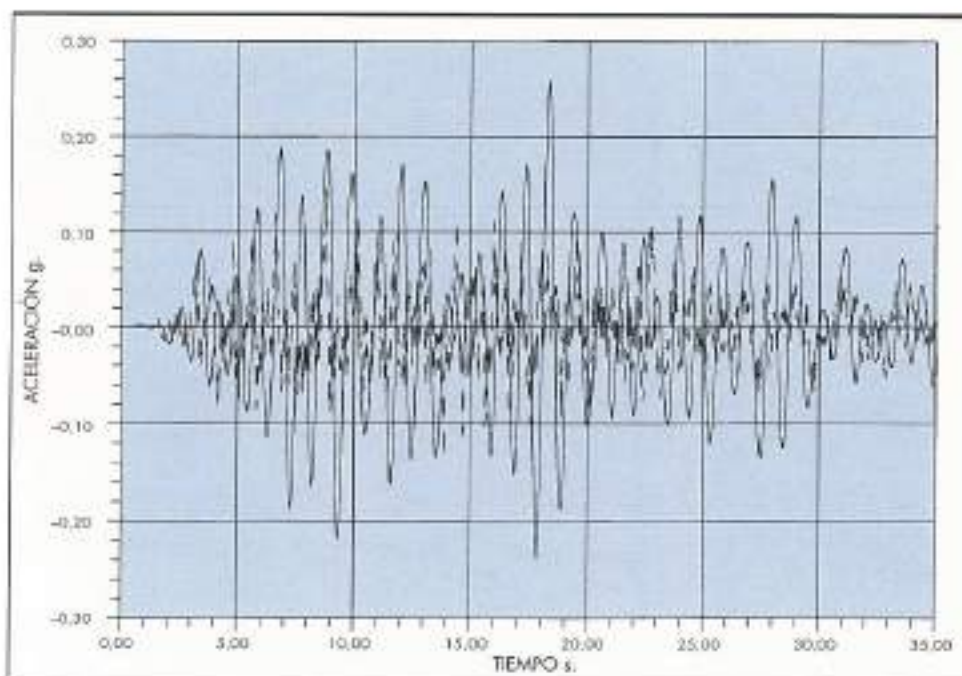


FIGURA 11. Respuesta de un oscilador lineal de 1 Hz de frecuencia natural y 5% de amortiguamiento al acelerograma de la figura 7.

NO LINEALIDAD

El espectro de respuesta elástica es una función utilizable, como se ha visto, en la resolución del comportamiento de estructuras lineales. No obstante, la generación de acelerogramas numéricos tiene uno de sus campos de empleo más obvios en la aplicación de las normas sísmicas a estructuras no lineales, de forma que se cumpla el espectro de diseño prescrito.

Si el modelo de comportamiento no lineal utilizado en el cálculo tiene en cuenta la fatiga a bajo número de ciclos, la historia previa de tensiones es determinante para el comportamiento actual. El espectro de respuesta recoge únicamente el valor máximo de la respuesta, y no su posición en el tiempo; ni, lo que es más importante, la amplitud de los ciclos previos de carga-descarga. Por tanto, es posible definir dos acelerogramas compatibles con el mismo espectro de respuesta, que den lugar a dos comportamientos muy distintos de la estructura calculada.

La forma de la función de modulación tiene una influencia muy marcada en el tipo de acelerograma resultante, así como los valores del espectro de respuesta con relación a la aceleración pico. Las figuras 10 y 11 presentan dos acelerogramas compatibles con el mismo espectro de respuesta, así

como la aceleración resultante para una estructura de un grado de libertad y 5 % de amortiguamiento. Es claro que el primero es mucho más exigente que el segundo a efectos de disipación histerética y fatiga.

BIBLIOGRAFÍA

- A. V. PINTO y P. PEGON (1991). "Numerical representation of seismic input motion", Kluwer Academic Publishers.
- GASPARINI, D. y VANMARCKE, E. H. (1976). "Simulated Earthquake Motions compatible with prescribed response Spectra" M.I.T. Department of Civil Engineering, Research report R76-4
- BARBAT, A. H. y ROCA, A. (1988). "Stochastic Prediction of Seismic Response Spectra", Seminar on the prediction of Earthquakes, Lisbon.
- CLOUGH, R. W. y PENZIEN, J. (1993). "Dynamic of Structures", Mc Graw Hill Publishers.
- PRIESTLEY, M. B. (1967). "Power Spectral Analysis of Non-Stationary Random Processes", Journal of Sound and Vibration.
- HOUSNER, G. W. y JENNINGS, P. C. (1964). "Generation of artificial earthquakes", J. Eng. Mech. Div.



SMOPYC'96

**UNA CITA CON LA
ULTIMA TECNOLOGIA
INTERNACIONAL PARA
GRANDES OBRAS**

**SALON INTERNACIONAL DE
MAQUINARIA PARA OBRAS
PUBLICAS, CONSTRUCCION
Y MINERIA**

ZARAGOZA. 16.2-20.2

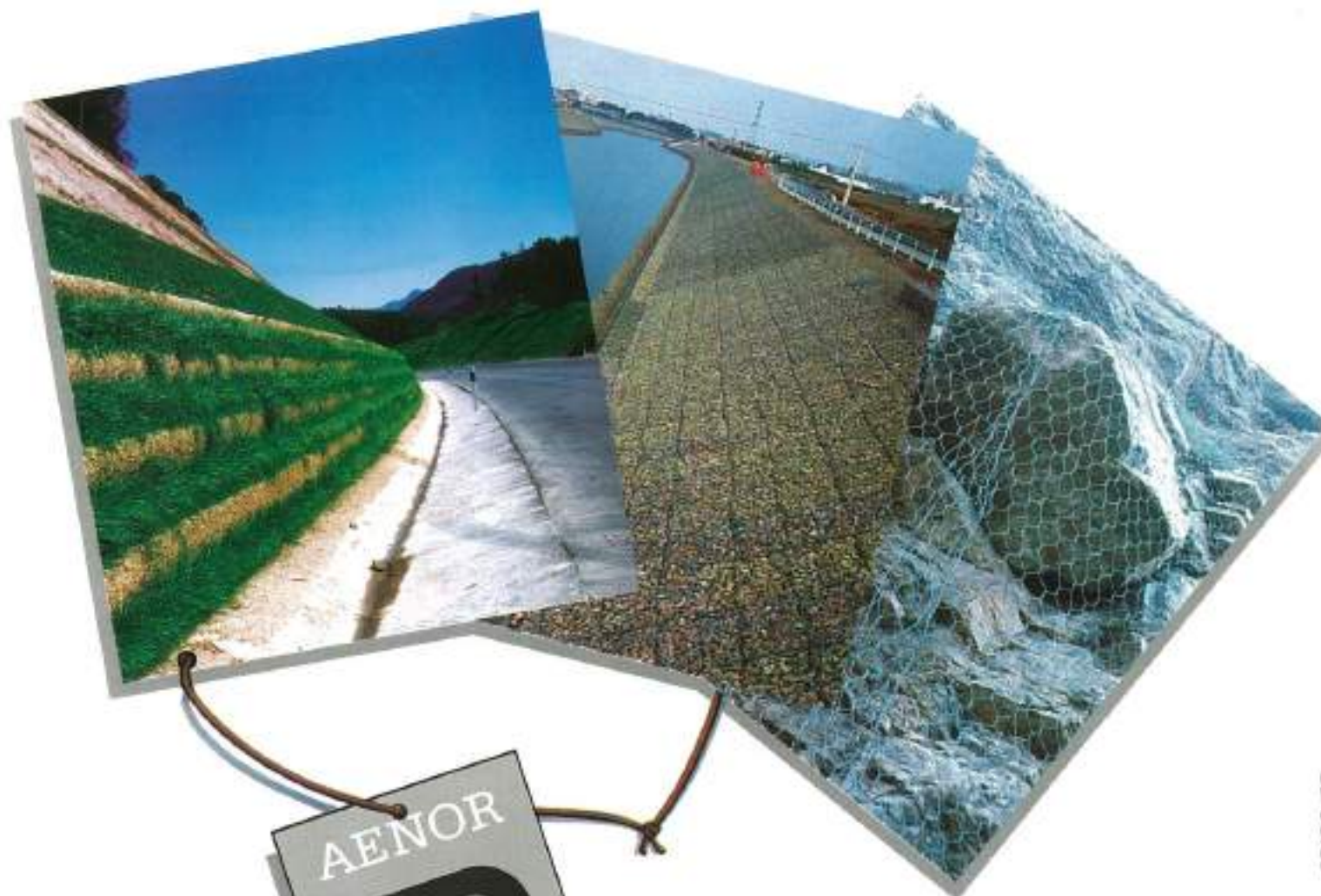
*El único Salón Internacional en
España para la Maquinaria de
Obras Públicas, Construcción y
Minería.*

*Donde verá y conocerá lo último
en equipos, técnicas y sistemas.
Donde descubrirá las tendencias
de los mercados internacionales
que van a tener un impacto
profundo en la economía
empresarial de la próxima década.*

*Venga a Zaragoza, venga a
SMOPYC '96*



***Nuestro Sistema de Calidad es
la garantía de nuestros clientes***



***... ahora
CERTIFICADO***

**gaviones
gaviones recubrimiento
enrejados triple torsión**



A. BIANCHINI, Ingeniero, S.A.

DIPUTACION, 279, 1º, 3º. TEL (93) 488 23 19. FAX (93) 487 45 86. 08007 BARCELONA. (ESPAÑA)