

Análisis de los primeros Acelerogramas obtenidos en España en la Presa de Béznar (Granada)

Por ANGEL PEREZ SAIZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director de OFITECO

ANTONIO ROCA ADROVER

Sismólogo. Jefe de Sección de Geofísica y Sismología del Servicio Geológico de la Generalidad de Cataluña.

GASPAR SANCHEZ BELCHI

Sismólogo. Departamento de Sismica de OFITECO

1. INTRODUCCION

La Presa de Béznar, bóveda de 110 m. de altura, está ubicada en una zona de elevado nivel de sismicidad, entre los núcleos sísmicos de Granada, Alhama y Motril situados, en el Sur de España.

Estos dos hechos, (importancia de la presa y nivel de sismicidad) obligó a la realización de un estudio de riesgo sísmico en la zona de emplazamiento que comprendía:

- 1.º Analizar toda la sismicidad de la región Sur de la Península Ibérica.
- 2.º Considerar diferentes muestreos temporales, realizando un estudio de estabilidad, con objeto de elegir las muestras más adecuadas para su tratamiento estadístico.
- 3.º Calcular leyes de atenuación a partir de las isosistas disponibles.
- 4.º Determinar el riesgo sísmico por tres procedimientos distintos:
 - a) método determinista.
 - b) método probabilístico sin zonificación
 - c) Idem con zonificación.

Para aplicar los métodos a) y c) se definieron dos zonificaciones alternativas, asociando los terremotos observados a diferentes regiones sismotectónicas.

La conclusión más importante de este estudio fue poder definir en el sitio de presa las intensidades siguientes:

Intensidad (MSK) en la Presa de Béznar	Período de retorno (años)
VIII	350
IX	1.000
X	6.000

El problema que se presenta a partir de aquí es asociar a una intensidad (I) determinada una aceleración de proyecto (a), ya que la simple correlación, I-a, basada en curvas empíricas es solo una primera aproximación.

Por ello, se proyecta en Béznar un sistema de instrumentación sísmica, sabiendo que si bien para el proyecto actual, la información que se obtenga de esta instrumentación no será de utilidad inmediata si contribuirá para que en España tengamos una serie de registros de acelerogramas que, convenientemente analizados, ayudarán a conocer las características de los terremotos asociados a nuestras estructuras sismogénicas, y por tanto a definir, los sismos de proyecto, para recálculo de estructuras ya construidas o proyectos de otras nuevas.

Esta instrumentación de Béznar ha permitido obtener el primer acelerograma en nuestro país cuyo análisis se presenta en este documento.

2. EL SISMO DEL 24 DE JUNIO DE 1984

A las 14 horas 30 minutos 50 segundos aproximadamente (tiempo universal) tuvo lugar un sismo con epicentro en la provincia de Granada, entre las poblaciones de Arenas de Rey y Motril.

El terremoto fue registrado por las estaciones sísmicas del Observatorio de Cartuja, por las de la Red Sísmica Nacional del Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.) y por sismólogos de otros observatorios de la Península Ibérica y de otros países.

A partir de los datos de tiempos de llegada de las diferentes fases en distintas estaciones

los organismos, correspondientes realizaron el cálculo hipocentral. Las coordenadas epicentrales, según el Observatorio de Cartuja, son $36^{\circ} 52' N$ y $3^{\circ} 44' W$, situando el sismo en materiales triásicos alpujárrides del dominio bético, en la Sierra de los Guájares, al sur de la Depresión de Granada (Vidal et al, 1988). El I.G.N., en su Boletín de Sismos Próximos (1984) sitúa el epicentro a $36^{\circ} 50'$ de latitud norte y a $3^{\circ} 44'$ de longitud oeste, calculando para este sismo una magnitud L_g de 5.0. La profundidad focal es, según el cálculo del I.G.N., 5 Km y, según el Observatorio de Cartuja 12 Km, tratándose, pues, de un sismo superficial.

La vibración producida en el campo próximo fue sentida en un número considerable de poblaciones de la zona. Se observaron grietas en edificaciones y otros efectos en Albuñuelos, jayena, Lenteji, Güajar Alto, Béznar, etc. El I.G.N. y el Observatorio de Cartuja recogieron y analizaron los datos macrosísmicos, confeccionándose mapas de isosistas (I.G.N., 1984; Vidal et al., 1988). La intensidad alcanzó el grado V en la escala M.S.K.

En la figura 1 se ha representado, sobre un mapa con los principales rasgos estructurales de la zona, el epicentro según determinación del Observatorio de Cartuja y según el I.G.N. Puede verse la Presa de Béznar, a unos 20 Km del epicentro. Además de los acelerógrafos instalados, en la Presa de Béznar, cuya situación y análisis de los registros se describe más adelante en este artículo, existían en la zona cinco acelerógrafos del I.G.N., de los cuales se obtuvieron registros en dos de ellos, ubicados en los puntos que se indican en la figura 1, uno de ellos en Alhama de Granada y otro en Santa Fe (Mezcua y López Casado, 1988).

Los registros obtenidos en la Presa de Béznar, junto a los de las localidades indicadas, son los primeros acelerogramas obtenidos en España, y de ahí el gran interés en su análisis y publicación.

3. EQUIPOS PARA EL CONTROL DINAMICO DE LA PRESA DE BEZNAR

Como ya hemos indicado la Presa de Béznar está enclavada en una de las zonas más sísmi-

cas de la Península Ibérica y, por ello, se proyectó una completa instrumentación sísmica con el fin de tener información no solo sobre los sismos producidos en la zona próxima, sino sobre el comportamiento dinámico de su estructura al ser excitada por las ondas de un terremoto, mediano o fuerte, originado en su proximidad.

Para este tipo de estudio, la instrumentación sísmica adecuada son acelerógrafos, equipos capaces de registrar excitaciones fuertes y, por tanto, de menor amplificación que los sismógrafos convencionales. Estos aparatos registran la aceleración con la que se ha movido el punto del suelo o la estructura situada bajo el sensor.

La Presa de Béznar tiene instalada una red de cuatro acelerógrafos interconectados. Estos

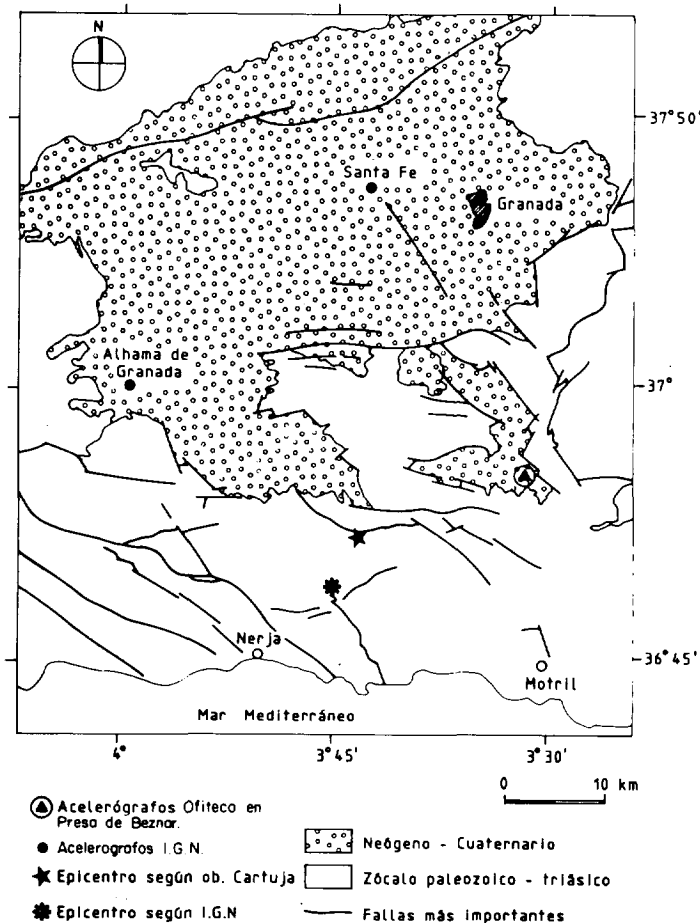


Fig. 1.— Mapa con situación de epicentros según I.G.N. (*) y según Universidad de Granada (+). Se indica la situación de la Presa de Béznar y de los acelerógrafos de OFITECO y del I.G.N. que registraron el sismo (.).

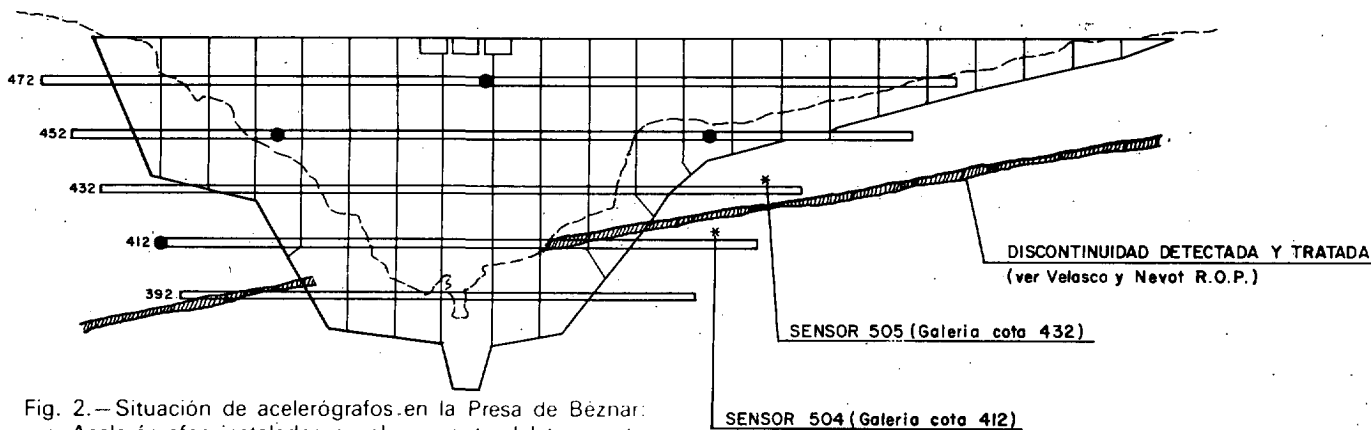


Fig. 2.—Situación de acelerógrafos en la Presa de Béznaar.

- * Acelerógrafos instalados en el momento del terremoto.
- Ubicación de acelerógrafos final prevista.

equipos se componen de una parte registradora y una sensora; los registradores, están interconectados entre si para conseguir una fase de tiempos y un disparo común; los sensores, distribuidos en diferentes puntos tanto en la estructura como fuera de ella (Fig. 2), de modo que podamos comparar el terremoto de «entrada» a la presa con el movimiento provocado en ella (A. Pérez Saiz y A. Roca, 1981).

El tipo de acelerógrafos instalados en la Presa de Béznaar son analógicos con registro en cinta magnética de cuatro pistas, (Fig. 3) donde quedan grabadas las tres componentes ortogonales de la aceleración más la señal de tiempo; los sensores son captadores de tipo electromagnético con respuesta plana en frecuencia entre 0.1 y 30 Hz. estos acelerógrafos analógicos constituyen la tercera generación de los desarrollados en España y son modelo OFITECO.

Actualmente el Instituto Geográfico Nacional va a instalar en todo el territorio nacional modelos digitales OFITECO que constituyen la quinta generación de los diseñados en España.

Para demodular las cintas, en la propia presa se dispone de una unidad de reproducción (ver Fig. 4), de modo que, de forma rápida, se tiene un registro en papel de la aceleración ocasionada por el terremoto en función del tiempo (acelerograma).

En el momento de producirse el sismo, la presa se encontraba en una primera fase de construcción y habían sido instalados, únicamente de forma provisional, dos acelerógrafos inde-

pendientes sin ninguna interconexión. Ambos se localizaban en roca compacta en galerías a distinta cota (Fig. 2), pero con una situación de especial interés ya que entre ellos existe una discontinuidad formada por una delgada capa arcillosa (Velasco y Nevot, 1987, R.O.P.).

Los sensores se encontraban orientados en las tres direcciones de la presa: vertical, V, (perpendicular al suelo y positivo hacia arriba),

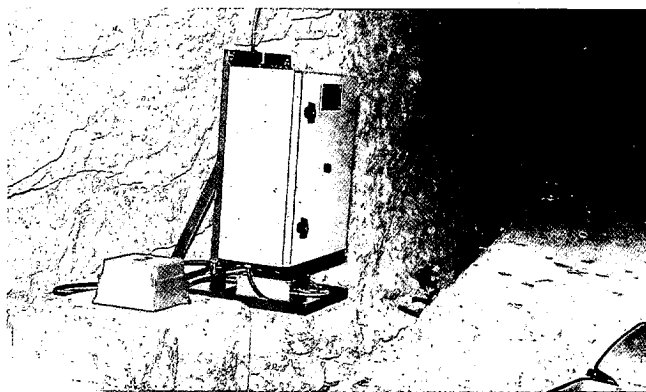


Fig. 3.—Acelerógrafo OFITECO AC-3 y sensor en una galería de la Presa de Béznaar.

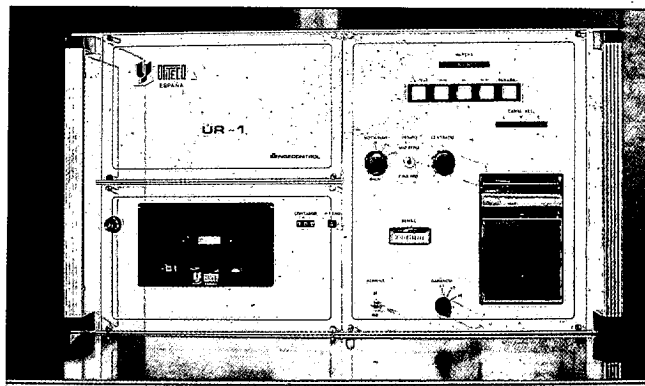


Fig. 4.—Unidad de reproducción OFITECO UR-1.

longitudinal, L, (según el eje tangencial de la presa y positivo hacia la margen derecha) y transversal, T, (según el eje transversal de la presa y positivo hacia aguas abajo). La nomenclatura de los dos sensores es la siguiente:

Sensor # 504: galería cota 412

Sensor # 505: galería cota 432

4. OBTENCION Y ANALISIS DE LOS REGISTROS

Una vez obtenidos los registros de aceleración mediante la unidad de reproducción, y para que sean de gran utilidad a los Ingenieros estructuralistas en su análisis del comportamiento de la estructura controlada, es necesario someterlos a un proceso de corrección y análisis, para obtener no solo la aceleración real inducida por el sismo en la estructura o suelo, sino calcular espectros, velocidades y desplazamientos, en los puntos de control. Este artículo recoge a continuación, el procedimiento que hemos seguido para la obtención de estos parámetros.

En primer lugar es necesario proceder a la digitalización, de los registros analógicos poniendo especial cuidado en esta tarea, por ser una de las principales fuentes de error (ver, por ejemplo, Shoja-Taheri, 1980). Una vez digitalizados, al primera corrección que hemos aplicado, ha sido por la línea base o deriva provocada durante los procesos de registro y de digitalización; también se ha aplicado a los registros una ventana de tipo coseno-rectángulo con la finalidad de suavizar los extremos.

A partir de este momento, todas las correcciones las hemos efectuado en el dominio de la frecuencia, es decir, hemos calculado los espectros de Fourier complejos mediante el algoritmo de la Transformada Rápida (FFT) y a éste, le hemos aplicado las correcciones siguientes y en este mismo orden:

a) Filtrado de bajas frecuencias: este paso es muy importante, sobre todo, a la hora de calcular velocidades y desplazamientos por amplificarse estas frecuencias durante el proceso.

b) Corrección instrumental: se trata de hacer una corrección mediante la función de transferencia del instrumento. Este paso no es decisivo en el caso concreto de los registros analizados, ya que la respuesta del equipo es prácticamente plana en las frecuencias predominantes de este terremoto.

c) Filtrado de altas frecuencias: es una corrección suave para eliminar altas frecuencias introducidas erróneamente durante el proceso de digitalización.

Una vez corregido el espectro, calculamos la antitransformada (mediante el mismo algoritmo FFT), y obteniéndose, así, los registros de aceleración corregidos.

Igualmente, dividiendo el espectro complejo corregido por $i\omega$ y por $-\omega^2$ (donde i es la unidad imaginaria) y calculando la antitransformada, obtenemos los registros de velocidad y desplazamiento en función del tiempo, respectivamente.

Los resultados finales de todo el proceso se muestran en las figuras 5 a 9 que contienen la siguiente información:

Figura 5, muestra los acelerogramas corregidos obtenidos en el sensor # 504 (tres componentes).

Figura 6, presenta las tres componentes de la aceleración registradas en el sensor # 505.

Figuras 7 y 8 incluyen las gráficas de velocidad y desplazamiento obtenidas por el proceso indicado a partir de las aceleraciones corregidas, para el sensor # 504.

5. ANALISIS ESPECTRAL

En Sismología e Ingeniería Sísmica se utilizan generalmente dos diferentes tipos de representaciones espectrales de los registros.

La primera, más usual en el campo de la sismología, es la transformada de Fourier. Dada una función del tiempo $r(t)$ se obtiene una función de la frecuencia angular ω , $R(\omega)$. $R(\omega)$ es una función compleja que puede descomponerse en dos partes: módulo y argumento. Así se tienen dos espectros: el de amplitudes y el de fases.

ANÁLISIS DE LOS PRIMEROS ACELEROGRAMAS OBTENIDOS EN ESPAÑA

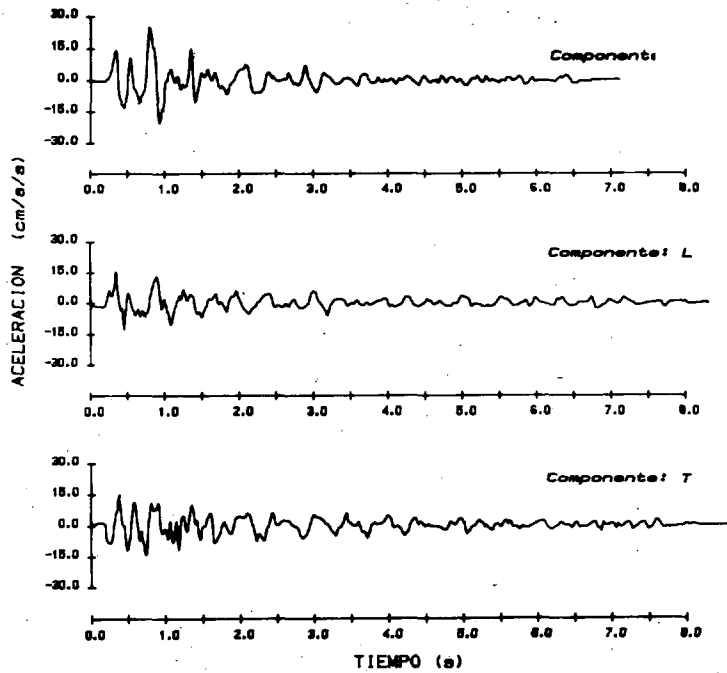


Fig. 5.—Acelerogramas corregidos. Sensor # 504.

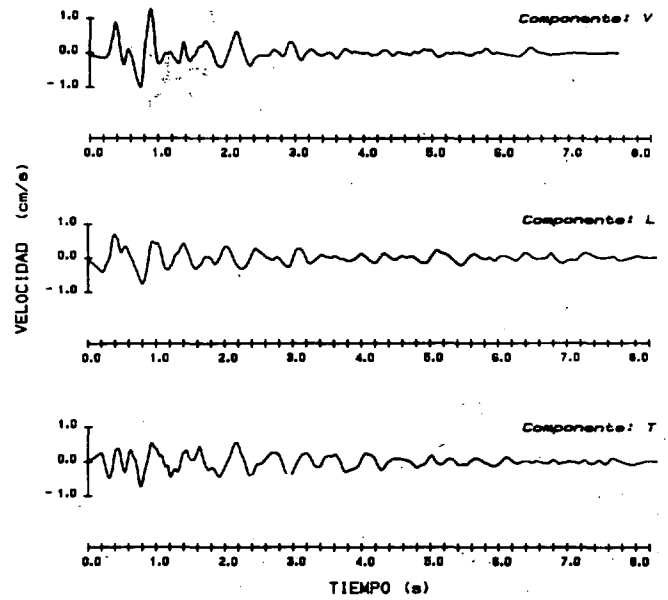


Fig. 7.—Velocidades. Sensor # 504.

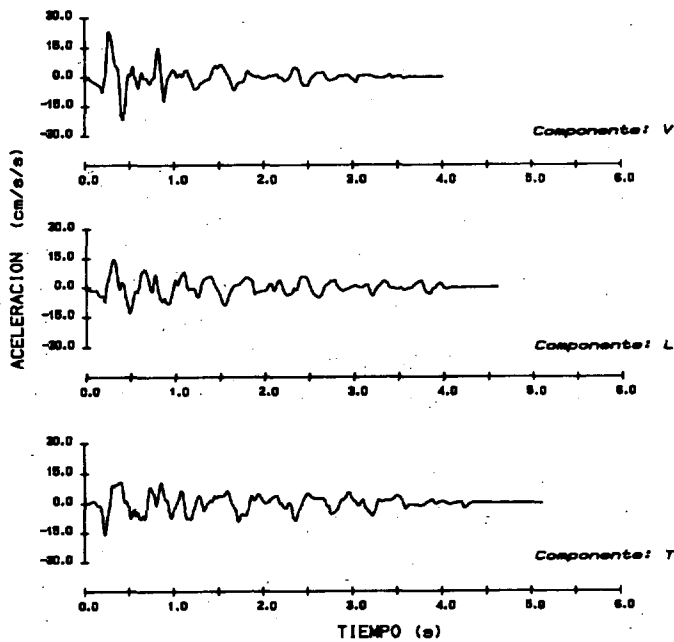


Fig. 6.—Acelerogramas corregidos. Sensor # 505.

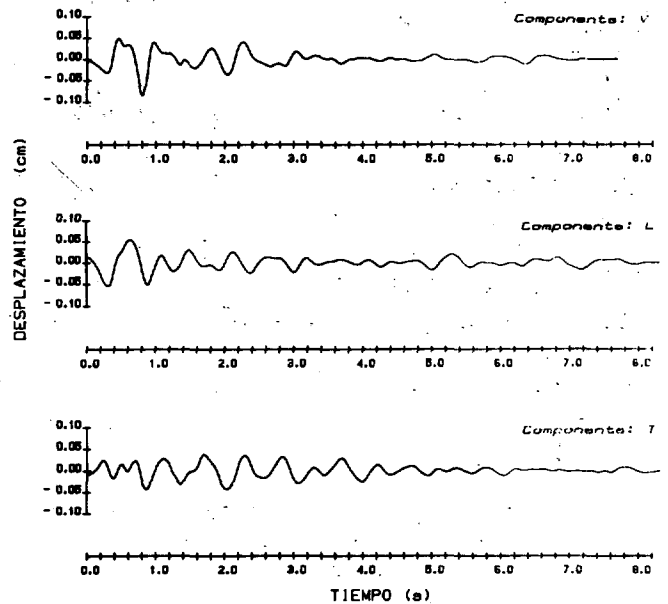


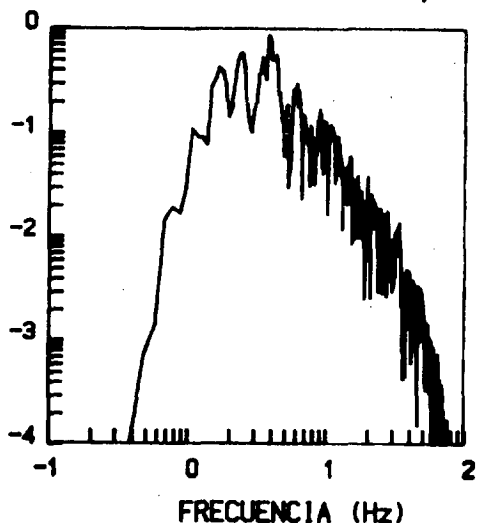
Fig. 8.—Desplazamientos. Sensor # 504.

El espectro de amplitudes da información sobre la distribución de la señal en las distintas frecuencias.

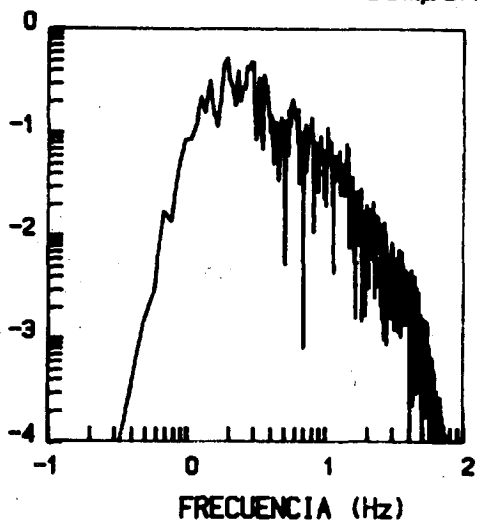
Como se ha indicado en el apartado anterior, para su cálculo se utilizan algoritmos numéricos rápidos (FFT).

En la figura 9 se muestran los espectros de amplitud de Fourier de la aceleración en escala logarítmica, correspondientes a las tres componentes del movimiento registrado en el sensor # 504, situado en la cota 412. Se observa, en las tres componentes, una distribución má-

Componente: V



Componente: L



Componente: T

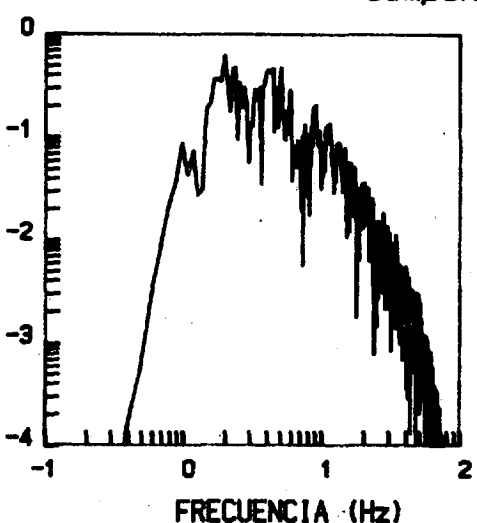


Fig. 9.—Espectros de Fourier. Sensor # 504.

xima de energía en la banda de frecuencia de 2 a 5 Hz. Un pico de máxima aceleración en la frecuencia de 2 Hz está más definido en las componentes vertical predomina una frecuencia más alta, alrededor de los 4 Hz.

El análisis de Fourier de los tres registros correspondientes a la cota 432 da unos espectros que no difieren significativamente de los obtenidos para la cota 412. El rasgo más diferencial es el pico de más alta frecuencia (3 Hz) en la componente longitudinal del sensor # 505 situado en la cota 432.

Otra representación espectral, que tiene más sentido en ingeniería, es el espectro de respuesta. Este es el que se considera en general en el diseño antisísmico de estructuras. El espectro de respuesta suministra el valor máximo de respuesta de un oscilador armónico simple sometido a la vibración —acelerograma—, en función de la frecuencia (o el período), natural de este oscilador. El espectro de respuesta se calcula para diferentes valores de amortiguamiento.

Dependiendo del parámetro que se escoja para caracterizar el movimiento (respuesta) del oscilador, se tienen diferentes representaciones del espectro de respuesta. Si $a(t)$ es la aceleración absoluta del suelo, como, por ejemplo, se ha representado en las figuras 5 y 6, la respuesta del oscilador puede caracterizarse bien por $x(t)$, desplazamiento relativo de la masa con respecto al suelo o bien por $y(t)$, desplazamiento absoluto. Así se tienen los siguientes espectros de respuesta utilizados en la práctica:

$SD = |x(t)|$ = espectro de respuesta de desplazamiento relativo.

$SV = |\dot{x}(t)|$ = espectro de respuesta de velocidad relativa.

$SA = |\ddot{y}(t)|$ = espectro de respuesta de aceleración absoluta.

$PSV = \frac{2\pi}{T} SD$ = espectro de pseudovelocidad.

$PSA = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 SD$ = espectro de pseudoaceleración.

T = período natural del oscilador.

La definición matemática y detalles del cálculo de espectros de Fourier y de respuesta

puede verse, por ejemplo, en Hudson (1979), Barbat (1983) y otros textos de Ingeniería Sísmica.

La figura 10 muestra los espectros de respuesta en desplazamiento, SD, en aceleración, SA, y el espectro de pseudovelocity, PSV, calculados a partir de la componente vertical del movimiento de la cota 412.

6. DISCUSION DE RESULTADOS

En la tabla 1 se dan los valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento, observados en cada una de las tres componentes de los acelerógrafos. Dos columnas muestran los valores de aceleración: en la primera se dan los valores obtenidos directamente después del proceso de digitalización; la segunda muestra los valores de aceleración absoluta, una vez realizado el proceso de corrección indicado anteriormente. Puede verse, pues, el efecto de corrección, que generalmente se traduce en una disminución de los valores máximos.

Tanto los valores de aceleración como los deducidos de velocidad y desplazamiento son muy bajos, en consonancia con el grado de intensidad macrosísmica IV-V asignado a la zona. Para este terremoto concreto cabe destacar que las mayores aceleraciones se dan en las componentes verticales, lo que supone un hecho importante a considerar en el caso de un estudio dinámico de la Presa de Béznar.

La tabla 2 presenta los valores máximos de los espectros de respuesta calculados, para cada una de las componentes de los acelerógra-

TABLA 1
VALORES MAXIMOS

Sensor	Compo- nente	Aceleración sin corregir (cm/s ²)	Aceleración corregida (cm/s ²)	Velocidad cm/s	Despla- zamiento (cm)
# 504 (cota 412)	L	19	16	- 0,74	- 0,05
	V	26	25	1,27	- 0,08
	T	- 15	15	- 0,72	- 0,04
# 505 (cota 432)	L	17	14	- 0,62	- 0,06
	V	26	23	1,12	- 0,07
	T	- 17	- 16	- 0,76	- 0,05

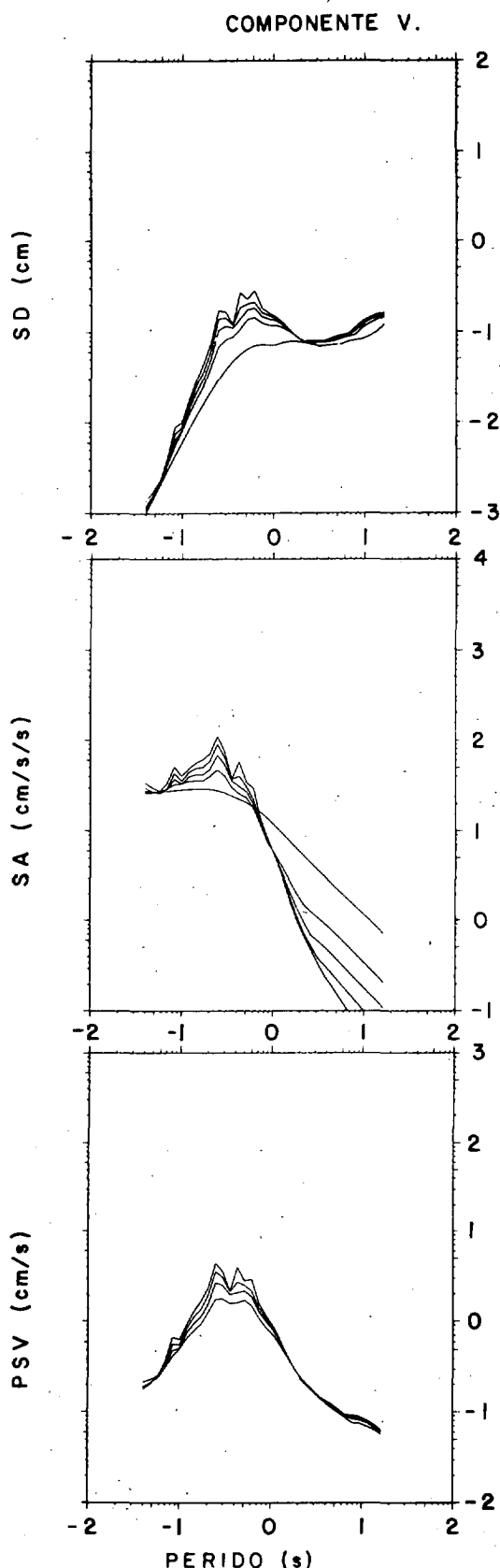


Fig. 10.—Espectros de respuesta SD, SA y PSV para la componente vertical del sensor # 504, calculadas para amortiguamientos del 2, 5, 10 y 20 % del crítico.

TABLA 2

PRIMER PICO EN LOS ESPECTROS DE RESPUESTA CALCULADOS PARA AMORTIGUAMIENTO 5 %

Sensor	Compo- nente	Espectro de Aceleración SD (cm) T (s)		Espectro de Aceleración SA (cm/s ²) T (s)		Espectro Velocidad SV (cm/s) T (s)		Espectro de Pseudovelo PSV (cm/s) T (s)	
# 504 (cota 412)	L	0,20	0,60	36	0,30	2,4	0,50	2,2	0,50
	V	0,21	0,60	91	0,25	3,4	0,25	3,6	0,25
	T	0,18	0,50	60	0,25	2,3	0,50	2,4	0,25
# 505 (cota 432)	L	0,16	0,40	46	0,35	2,6	0,35	2,6	0,35
	V	0,18	0,60	58	0,25	2,4	0,35	2,5	0,30
	T	0,20	0,60	34	0,20	2,4	0,40	2,3	0,40

fos, considerando un amortiguamiento del 5 por 100. Se da sólo el valor del mayor pico de cada uno de los espectros SD, SA, SV y PSV, indicándose el valor del período para el cual ocurre este máximo. Al observar estos valores debe tenerse presente la forma de los espectros calculados (ver figura 10): en ellos el primer pico no es un valor enormemente significativo, pues, en el mismo espectro se encuentran un segundo y, a veces, un tercer pico que no difiere mucho del primero.

ta magnética de los acelerógrafos AC-3 permite obtener gráficas a diferentes amplificaciones, para su posterior digitalización. No obstante, estos acelerogramas «directos» deben ser cuidadosamente procesados. Por ello los nuevos instrumentos diseñados y en proceso de instalación en todo el país son digitales (Figura 11) que permitirán no solo la obtención de acelerogramas en España sino la realización de todos estos cálculos de forma totalmente automática, evitándose el paso previo de digitalización.

NOTA FINAL

Queremos indicar una vez más que el interés de los acelerogramas obtenidos, aunque de valores de aceleración bajos, reside en el hecho de ser los primeros obtenidos en nuestro país y por tanto los primeros registros españoles susceptibles de ser procesados de la forma descrita en este trabajo. El tipo de registro en cin-

REFERENCIAS

1. BARBAT, A. H., 1983.: Cálculo sísmico de las estructuras. Editores Técnicos Asociados, Barcelona 328 pp.
2. HUDSON, D. E. 1979.: Reading and interpreting strong motion acelerograms. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, 112 pp.
3. INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL, 1984.: boletín de Sismos Próximos, segundo trimestre año 1984.
4. MEZCUA, J y LOPEZ CASADO, C., 1988.: Primeros acelerogramas registrados en España. Instituto Geográfico Nacional, Madrid. (En preparación).
5. OFITECO.: Informe de riesgo sísmico del emplazamiento de la Presa de Béznar (Granada).
6. PEREZ SAIZ, A. y ROCA, A., 1981.: Criterios básicos sobre instrumentación sísmica de presas y embalses. Revista de Obras Públicas 3194, 499-505.
7. SHOJA-TAHERI, 1980.: A new assesment of errors from digitization and base line corrections of strong-motion acelerograms: Bull seism. Soc. Am, 70. p. 293-303.
8. VELASCO, D. y NEVOT, A.; 1987.: Presa de Béznar (Granada). Confederación Hidrográfica del Sur de España. Revista de Obras Públicas núm. 3262, octubre 1988 páginas 619-625.
9. VIDAL, F. ALGUACIL, G. de MIGUEL, F. ROMACHO, M. D. y PAYO, g.; 1988.: The earthquake of June 24, 1984, at the centenal of destructive Andalusian earthquake of 1884. Com. Reunion European Sismological Commission, Sofia.

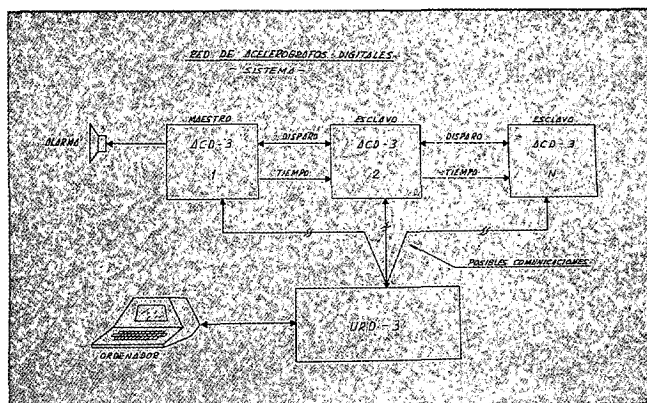


Fig. 11.—Esquema de acelerógrafos digitales en memoria de estado sólido OFITECO conectados directamente a un ordenador.