

Criterios básicos sobre instrumentación sísmica de presas y embalses (*)

Por ANGEL PEREZ SAIZ

Ingeniero de Caminos

ANTONIO M. ROCA ADROVER

Sismólogo

El fenómeno de la sismicidad inducida por embalses, y el estudio de la respuesta dinámica de una presa frente a un terremoto son dos problemas de gran importancia. La necesidad de una instrumentación sísmica adecuada viene ampliamente justificada por los beneficios que se deducen de la información que estos instrumentos pueden suministrar.

La elección del equipo idóneo puede hacerse en función del volumen y tipo de información que interese obtener en cada caso concreto.

1. INTRODUCCION

A la consideración del riesgo potencial que supone la ocurrencia de terremotos naturales en las cercanías de una presa —riesgo que aumenta al ubicarse la misma en una región de cierto grado de sismicidad— debe añadirse otro fenómeno asociado: el de la sismicidad inducida. Es conocido desde hace tiempo el hecho de que la creación de embalses puede modificar el régimen sísmico de la zona donde se sitúan y que esta modificación ha supuesto, en ocasiones, el desencadenamiento de terremotos de magnitud relativamente elevada (por encima de 6,0 en determinados casos) que han producido daños en la propia obra de la presa (figura 1).

El problema ha adquirido particular relieve y a él se han dedicado algunas reuniones internacionales. En el trabajo de López Arroyo y Pérez Saiz (1975) se resumen los datos publicados y los aportados en algunas reuniones dedicadas a este tema. En líneas generales, puede advertirse (aunque a veces estos datos sean poco concluyentes) que determinadas características de la presa y el vaso de embalse (altura superior a 100 m., presencia de fallas, etc.) hacen más probable la ocurrencia de sismos inducidos.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de Septiembre de 1981.

El fenómeno de la sismicidad inducida, que ha sido extensamente observado en diferentes regiones, muchas de las cuales eran previamente consideradas sísmicamente no activas, es difícil de reconocer a priori, por lo cual en cada caso concreto se recomienda establecer una vigilancia sísmica, con una doble finalidad:

1. Reconocer si se produce sismicidad inducida, distinguiéndola de la ambiental, realizando observaciones antes y después de la creación del embalse.
2. Proporcionar información que permita predecir la ocurrencia de sismos de gran magnitud, que puedan afectar a la propia estructura.

Por otra parte, tanto si se construye una presa en una región con cierto grado de sismicidad, como si se considera la posibilidad de terremotos inducidos, es muy recomendable la instalación de un equipo de control dinámico, compuesto por acelerógrafos situados en diferentes puntos del suelo y de la estructura. La ocurrencia de un terremoto importante en una región cercana a la presa plantea, a diferentes niveles, una serie de cuestiones que no pueden contestarse si no se dispone de este tipo de instrumentación. Si ocurre algún tipo de daño estructural, no existe modo alguno, sin estos instrumentos, de comparar el comportamiento de la presa con las hipótesis de diseño, para inferir posibles mejoras en proyectos futuros, o para realizar deci-

siones racionales a la hora de reparar a reforzar la estructura.

Si no se manifiestan claramente daños importantes es difícil, sin disponer de medidas de magnitudes dinámicas, decidir que tipo de inspección debe llevarse a cabo, lo que acarrea a la postre gastos económicos muchísimo más elevados que la inversión inicial que supone la instalación de unos cuantos acelerógrafos.

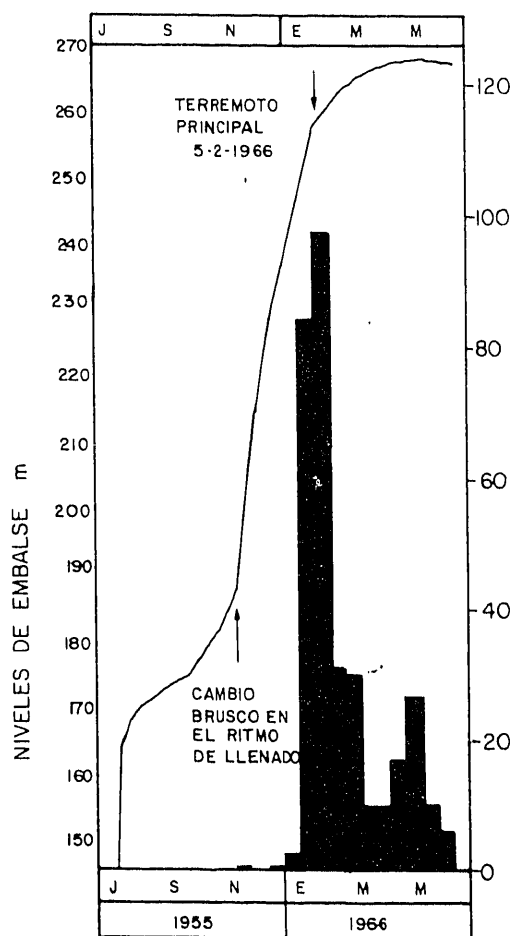


Fig. 1. PRESA DE CREMASTA. Niveles de embalse y terremotos para periodos de 15 días (Galanopoulos, 1967).

Este artículo resume el tratamiento, mediante una instrumentación adecuada, de ambos fenómenos: sismicidad ambiental e inducida y respuesta dinámica de la estructura y la fundación.

2. ESTUDIO DE LA SISMICIDAD AMBIENTAL Y SU DISCRIMINACION DE LA INDUCIDA POR EL PROPIO EMBALSE.

2.1. Modos de estudio:

En el artículo de López Arroyo y Pérez Saiz (1975) se incluye una relación detallada de los métodos de estudio existentes. Estos se basan en el conocimiento de diferentes parámetros que sirven de base para definir la sismicidad de una zona. Resumimos aquí los más usuales:

a) Localización de los focos sísmicos:

En este método se intenta definir con la mayor precisión posible, la posición de los focos de los sismos y comprobar que los mismos pueden ser razonablemente adscritos a la acción del embalse. Su aplicación requiere la instalación de una red específica de sismógrafos que permita estudiar los terremotos de pequeña magnitud.

b) Frecuencia media de sismos:

En este método se intenta relacionar la variación del número de sismos, con los tres factores que pueden influir en su generación:

- Ritmo de llenado del embalse.
- Máximo nivel alcanzado.
- Tiempo durante el cual se mantiene el máximo nivel y por tanto la máxima carga.

c) Características de la serie de precursores y réplicas.

En este grupo se incluyen los métodos que consideran distintas características de la distribución de sismos que preceden y siguen al mayor de una serie. Entre ellos citaremos:

- Los que estudian la morfología de la secuencia premonitorios — sismo principal — réplicas,
- los que tienen en cuenta la distribución temporal de réplicas,
- los que analizan la distribución de los intervalos de tiempo entre terremotos consecutivos, y por último,
- los que tienen en cuenta la distribución de las magnitudes.

d) Mecanismo focal.

Este método, que permite reconocer el tipo de falla (normal, inversa, de desplazamiento horizontal) así como su orientación y el sistema de esfuerzos que ha producido el sismo, se basa en la distribución espacial del carácter de las ondas de compresión y dilatación de las ondas P captadas en estaciones próximas al epicentro.

2.2. Sismógrafos y su distribución. Características de los equipos a instalar.

Para aplicar los métodos de estudio enumerados, deben instalarse redes apropiadas de instrumentos en una región más o menos extensa en torno a la zona del embalse. Los sismógrafos son los instrumentos que proporcionan los datos necesarios para reducir los parámetros que definan la sismicidad de la zona y permiten discriminar el fenómeno de los terremotos inducidos.

El número de instrumentos y su localización es función del volumen y tipo de información que se desea obtener en cada caso concreto. En general se considera suficiente el emplazamiento de cuatro o cinco sismómetros, funcionando con una amplificación apropiada, distribuidos convenientemente en torno al embalse (fig. 2).

Si no existen evidencias geológicas que hagan pensar en un nivel alto de probabilidad de ocurrencia de sismos inducidos, se puede empezar instalando inicialmente un solo equipo. En función de los datos obtenidos mediante este equipo, se instalarían otros tres, cuatro o más sismómetros, para completar una red apropiada de observación microsísmica. No obstante, es lógicamente preferible la instalación de una red completa que empiece a proporcionar información en un período de tiempo lo más extenso posible, durante la construcción de la presa, mucho antes del primer llenado. Estos criterios coinciden con las recomendaciones de la Conferencia Intergubernamental sobre la evaluación y la disminución de los riesgos sísmicos (UNESCO, París, Febrero 1976).

Aunque al decidir sobre los instrumentos a instalar debe pensarse en el alcance de la información

deseada, y debe estudiarse cada caso concreto, teniendo en cuenta la geología del área de embalse y el riesgo sísmico de la zona, pueden darse una serie de recomendaciones y opciones:

a) Es muy importante que los equipos utilizados tengan un gran margen de sensibilidad, con amplificación ajustable o ganancia variable, que permita el registro de microterremotos, así como de perturbaciones de gran amplitud cuando trabaje a baja magnificación.

b) Si se instala inicialmente un solo equipo, éste debe ser portátil, e incluir un sensor de componente vertical con frecuencia propia próxima a los 2 hz, sistema de amplificación y filtrado, registrador grá-

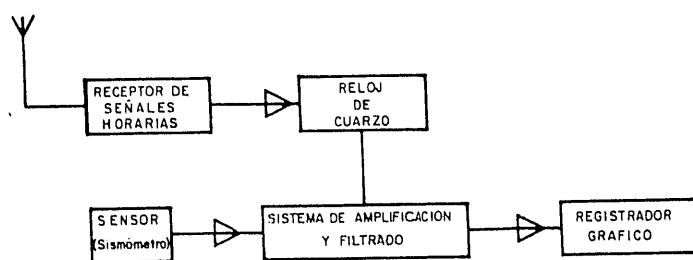


Fig. 3a. Diagrama de bloques de una estación simple con registro gráfico continuo.

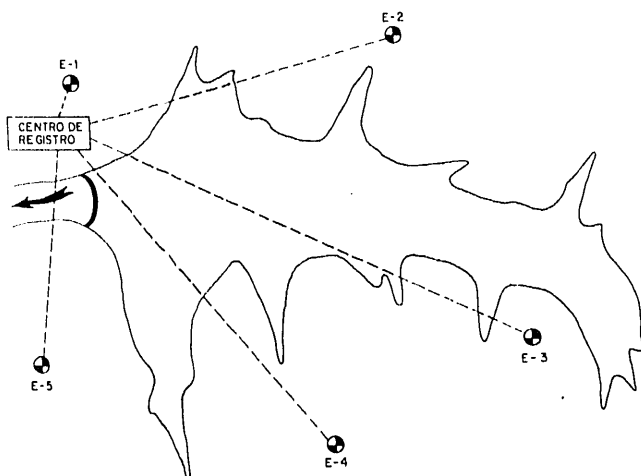


Fig. 2. Distribución de sensores en torno a un embalse en un sistema centralizado para estudio de microsismicidad.

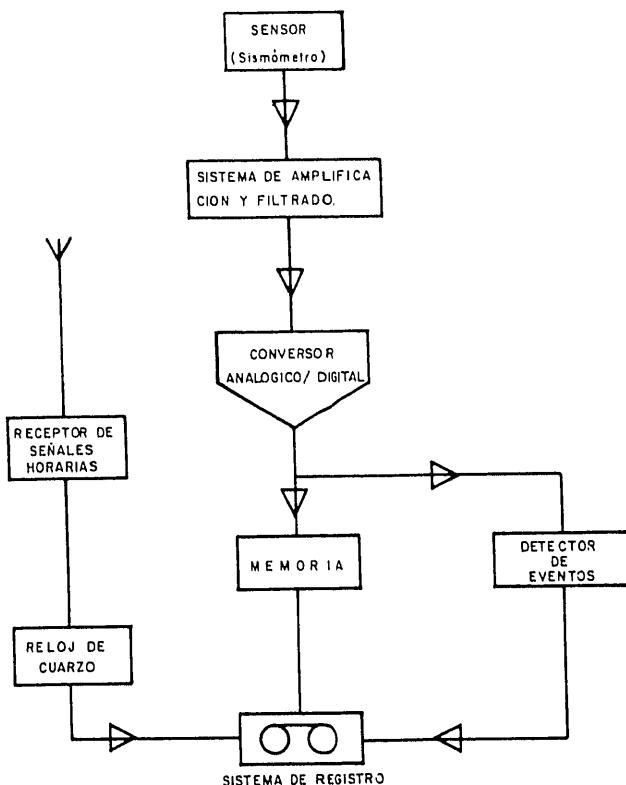


Fig. 3b. Diagrama de bloques de una estación con disparo automático y registro automático y registro digital.

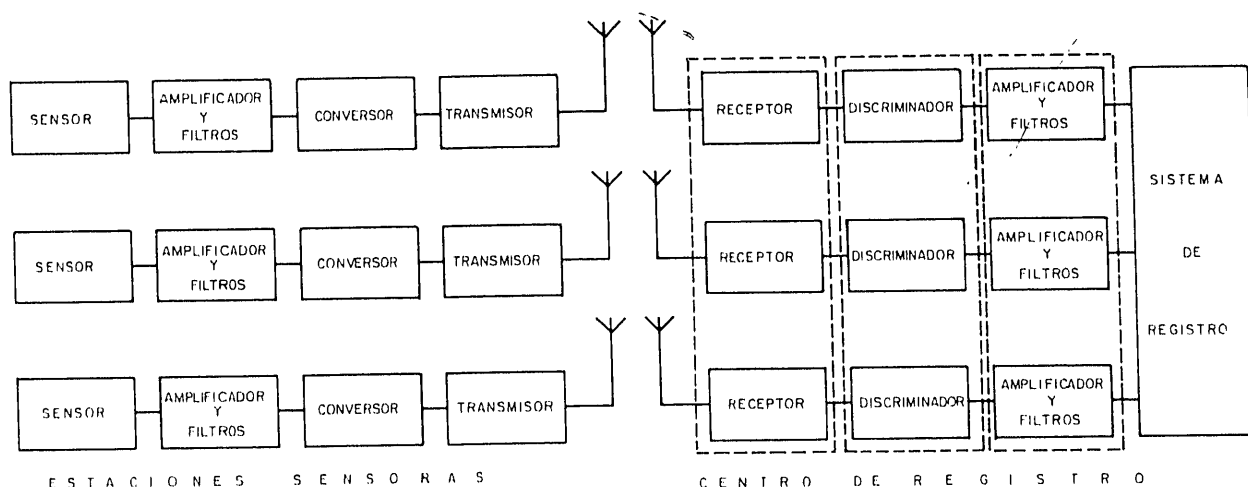


Fig. 4. Esquema de un sistema centralizado para estudio de microsismicidad.

fico o magnético-digital y sistema de tiempo (figura 3).

c) Al instalar una red de instrumentos en torno al embalse para poder realizar un seguimiento espacio-temporal de los sismos, caben dos opciones fundamentales: una serie de instrumentos portátiles (4 ó 5) individuales, o un sistema de registro centralizado por telemetría (fig. 4).

d) Tanto en el caso de estaciones individuales como en sistemas centralizados, puede optarse por dos formas fundamentales de registro: gráfico directo (fig. 5) ó digital en cinta magnética, disco o diskette. El equipo digital puede presentar ciertas ventajas (ampliación del rango dinámico, facilidad de tratamiento numérico posterior, etc.). Sin embargo para la mayoría de los casos donde el

costo y la facilidad de manejo sean factores importantes, un equipo analógico puede ser absolutamente eficaz.

3. CONTROL DE LA RESPUESTA DINAMICA DE LA PRESA. (ESTRUCTURA Y FUNDACION)

3.1. Principios de control:

En 1960 presentó Ambraseys a la 2.^a Conferencia mundial sobre Ingeniería Sísmica un resumen del comportamiento de una serie de presas de tierra (un total de 54) ante la acción de terremotos ocurridos en su proximidad. Con posterioridad se han publicado varios estudios particulares sobre determinados embalses, en relación con terremotos más recientes; por otra parte, diversos autores han estudiado teóricamente el tema en los últimos años, siendo particularmente interesantes los resultados obtenidos por aplicación de métodos de elementos finitos. Y, correlativamente, se han realizado ensayos en laboratorio con modelos de presas a las que se ha sometido a sollicitaciones que simulan las de un terremoto.

Tanto revisando la información sobre presas y terremotos reales, como al estudiar los resultados de las investigaciones teóricas y los experimentos con modelos, se observa una gran variedad en la respuesta de las presas. Esta variedad responde a la complejidad de los parámetros que ejercen influencia. Citaremos entre ellos:

—El mecanismo focal de los terremotos de que se trate, que determina el espectro y la historia

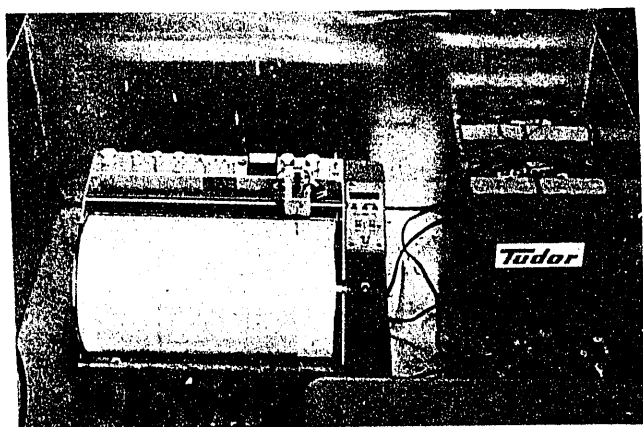


Fig. 5. Equipo portátil para estudios de microsismicidad, con registro gráfico continuo (Sprengnetter instruments).

de la radiación sísmica en la dirección de la presa.

- La trayectoria del foco a la presa, a lo largo de la cual es modificado el espectro anterior, dependiendo esta modificación no sólo de la distancia sino también de la geología del medio.
- La estructura y composición del terreno inmediatamente bajo la presa, que da la forma final de la acción sísmica sobre ésta.
- La interacción presa-cimiento.
- La configuración de la propia presa, que define la respuesta a la sollicitación sísmica.

Se han desarrollado teorías para el cálculo del efecto de cada uno de los parámetros anteriores, pero la apreciación de éstos es, en general, complicada y los esquemas de cálculo suelen aplicarse a casos simplificados, de validez limitada. Tampoco es admisible la generalización de datos observados en casos reales, como indicábamos al principio.

Todo esto lleva a la necesidad de estudiar el comportamiento de cada presa en particular, dentro de su ambiente geológico y sometida a los terremotos que realmente actúan sobre ella. En primer lugar la enseñanza derivada de la observación de la respuesta terremotos débiles será de gran utilidad para predecir lo que sucederá en caso de sismos de mayor entidad.

En segundo lugar, algunos de los resultados generales deducidos de los cálculos simplificados y de la observación puede ayudar a determinar el emplazamiento óptimo de los elementos sensores que definan el comportamiento de la presa. Tal es por ejemplo, el hecho observado de que la existencia de superficies de contacto entre materiales de distinta rigidez (como pueden encontrarse en la base y en los estribos de la presa o en fallas) pueden determinar un desfase en las vibraciones originadas por un terremoto, con el consecuente daño de la estructura. Y también las causas de fallo de presas de tierra observadas en determinados casos, como el deslizamiento por despegue de la base cuando la aceleración relativa alcanzada exceda el coeficiente de fricción entre presa y cimiento, y el derrumbamiento de taludes debido a fuerzas de inercia horizontales y verticales, causa muy relacionada con la variación prevista de la aceleración desde la base a la coronación de la presa.

Como se deduce de lo dicho anteriormente, son de gran interés los resultados de los estudios de comparación de cálculos dinámicos teóricos con la observación. En ésta se debe, por tanto, tratar de

obtener datos reales sobre el comportamiento, en un número suficiente de puntos que permitan la interpolación a cualquier zona de la presa.

Los equipos que se utilicen para ello deben proporcionar registros de los que sea posible deducir los valores instantáneos, a lo largo de toda la duración del terremoto, de diferentes parámetros: aceleración, velocidad, desplazamiento.

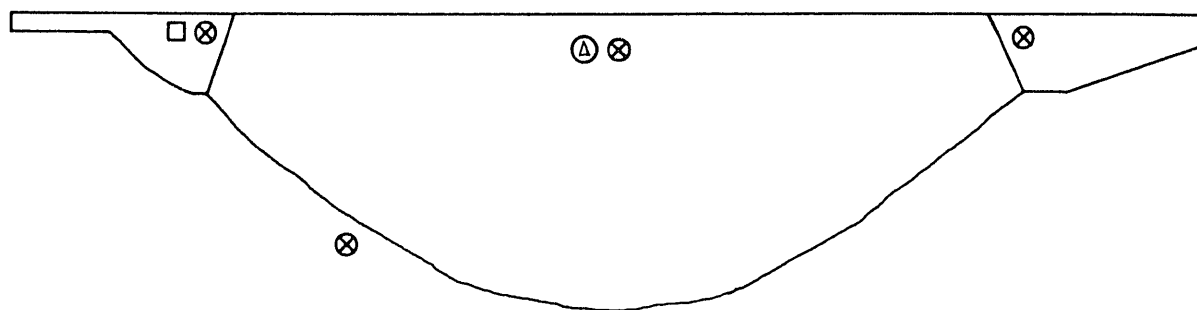
Con los registros obtenidos debe ser también posible la realización de análisis numéricos posteriores, debiendo ser fácil el cálculo de espectros de respuesta, funciones de correlación, etc. Esto hace imprescindible el uso de acelerógrafos, instrumentos que suministran un registro continuo de la aceleración en función del tiempo, durante toda la duración del movimiento.

3.2. Acelerógrafos y su distribución. Características de los equipos a instalar.

La necesidad de obtener los parámetros dinámicos en el apartado anterior, elimina la posibilidad de usar simples instrumentos de registro de valores pico, como equipo básico de observación; no obstante, el uso de un sistema de acelerógrafos no excluye la posibilidad de contar en algunos puntos de la presa con tales registradores de aceleración máxima, cuyo costo es considerablemente inferior, para suministrar información suplementaria.

En cuanto al tipo de sensores, actualmente, los de mayores prestaciones y mejor curva de respuesta son, sin duda, los servoacelerómetros; aunque, por razones de tipo económico, puede optarse por la elección de captadores electromagnéticos o de reluctancia variable. En todo caso, deben ser tri-axiales, para suministrar información sobre las tres componentes ortogonales del movimiento. Deben ser robustos, resistentes a las condiciones ambientales, y al instalarlos deben acoplarse adecuadamente a la roca, suelo, o estructura, en el punto a auscultar.

Debe generalmente tenderse a instalar un elemento sensor (acelerómetro) en un punto de la roca y/o del suelo donde se asienta la presa, para de este modo tener información sobre las características del terremoto de "entrada". Otro acelerómetro debe situarse en punto donde se espere registrar los valores más altos de aceleración (generalmente cerca de coronación). Un número variable de instrumentos se instala en diferentes puntos de la estructura, en función del interés que tenga su auscultación, por ejemplo, en base, estribos, parte central, etc.



- ⊗ ACELEROMETRO (Sensor triaxial)
- ⊕ REGISTRADOR DE DESPLAZAMIENTOS
- SISTEMA DE REGISTRO CENTRALIZADO DE LOS ACELEROMETROS

Fig. 6. Distribución del sistema de control sísmico en una presa bóveda española.

Por supuesto, el número y distribución de los sensores debe decidirse teniendo en cuenta las características específicas de la presa y sus consideraciones de diseño. Conociendo el terremoto de "entrada" y la "salida" en diferentes puntos, es decir, la respuesta de la presa, deduciremos las funciones que nos definan el comportamiento dinámico de la misma. En la figura 6 puede verse la distribución de un sistema centralizado de control sísmico con registro analógico, instalado en una presa bóveda española.

Para que sea posible el cálculo de cambios de fase, y la correlación del movimiento en diferentes

puntos, es preciso que los acelerogramas tengan señales de tiempo comunes a todos. Por ello debe optarse por una de estas dos soluciones: interconectar unidades individuales (cada una de ellas formada por sensor y registrador) o instalar un sistema de registro centralizado (unidades sensoras en diferentes puntos y estación de registro común para todas). La fotografía de la figura 7 muestra la estación de registro y una unidad sensora de un sistema centralizado con registro analógico. Generalmente un sistema centralizado exige un menor mantenimiento.

4. CONCLUSIONES

La creación de embalses puede modificar el régimen sísmico de la zona de ubicación del mismo, habiéndose observado terremotos incluso en regiones que se consideraban sísmicamente no activas.

Es evidentemente necesario realizar un control adecuado, mediante redes de sismógrafos que suministren los datos suficientes para aplicar diferentes métodos de discriminación de la sismicidad inducida de la ambiental.

La respuesta dinámica de una presa —estructura y fundación— frente a un movimiento sísmico, constituye un problema complejo que se aborda mediante cálculos teóricos y experimentos con mo-

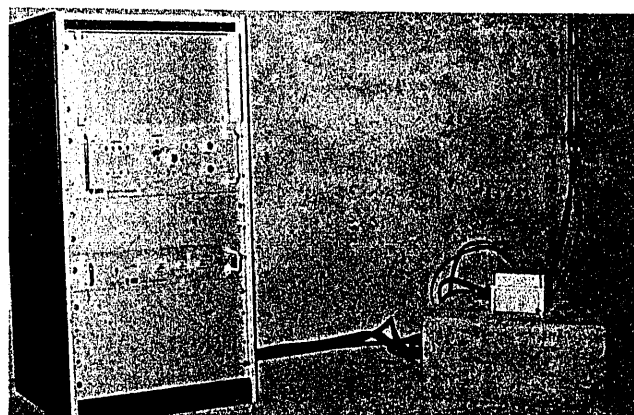


Fig. 7. Central de registro del sistema de acelerógrafos, de la figura 6, junto a una unidad sensora (Ofiteco).

delos reducidos, en laboratorio. No obstante, la generalización de resultados es difícilmente admisible, siendo necesaria la observación práctica de cada presa, mediante acelerógrafos, dentro de su ambiente geológico y sometida a terremotos reales.

Con la instalación de una red de acelerógrafos como una componente más del sistema de vigilancia de la presa, puede conocerse el comportamiento dinámico real de la misma cuando ocurre un terremoto cercano importante, y pueden responderse una serie de cuestiones muy importantes a la hora de tomar decisiones racionales sobre ésta y/o futuras construcciones.

Tanto para el estudio de la sismicidad inducida por el embalse, como para el control dinámico de la presa es muy importante la elección de los instrumentos adecuados. Sus características deben ser estudiadas en cada caso, en función del alcance de la información que se desea obtener.

BIBLIOGRAFIA

- AMBRASEYS, N. (1960). On the seismic behaviour of earth dams. Proc. 2nd. WCEE, Tokyo, vol. 1, 331-356.
- AMBRASEYS, N. (1962). The seismic stability of earth dams. Proc. 2nd. Symp. on Earth. Eng. Roorke, India.
- BOLT, B.A. and HUDSON, D.E. (1975). Seismic Instrumentation of Dams. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. GT11, 1095-1104.

- BUFORN, E. and UDIAS, A. (1979). A note on induced seismicity in dams and reservoirs in Spain. Bull. Seism. Soc. Am., 69, 1629-1632.
- GALANOPOULOS, A.G. (1967). The influence of the fluctuation of Marathon lake elevation on local earthquake activity in the Attica Basin. Ann. Geol. Pays Helleniques, 18, 281-306.
- IWAN, W.D. (editor) (1978). Proc. International Workshop on Strong Motion Earthquake Instrument Arrays. Honolulu, May 2-5, Earthquake Eng. Lab. Calif. Inst. Tech.
- LOPEZ ARROYO, A. y PEREZ SAIZ, A. (1975). Sismicidad inducida por embalses, métodos de estudio y sistemas de vigilancia. Rev. Obras Públ., 3125, 1-26.
- ROCA, A. (1978). Evolución reciente en instrumentación sísmica. Comunicación oral en el seminario sobre Criterios Sísmicos para Instalaciones Nucleares y Obras Públicas. Asoc. Española Ing. Sísm., Madrid.
- TALWANI, P. (1976). Earthquakes associated with Clark Hill reservoir, South Carolina - A case of induced seismicity. Eng. Geol., 10, 239-253.
- UNESCO. (1976). Conferencia Intergubernamental sobre la Evaluación y la Disminución de los Riesgos Sísmicos. París.
- WIEGEL, R.L. (editor) (1970). Earthquake Engineering. Prentice Hall, Inc., Englewood, N.J., 518 pp.