

# Reflexiones sobre la instrumentación de presas. Instrumentación automática. Enfoque actual en España

Por ANGEL PEREZ SAIZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Director gerente de OFITECO

*Para proyectar y construir presas más seguras y económicas es necesario disponer de la más completa información posible acerca del comportamiento de estas estructuras y de sus cimentaciones, lo cual puede conseguirse utilizando una instrumentación adecuada, cuyos principios básicos se exponen en el siguiente artículo.*

## 1. INTRODUCCION

La construcción de presas en España es algo tan antiguo como nuestra propia Historia. Desde las construidas por los romanos (Proserpina, Cornalbo) todavía en servicio, hasta las cerca de 900 grandes presas existentes hoy en día, entre ellas las más recientes e importantes: Almendra, Las Portas, Quentar, El Grado, Portodemouros, Tous, Canales, Beznar, Benínar, etc., el camino recorrido ha sido largo en función de los medios económicos y técnicos disponibles: maquinaria, tipo de mano de obra, laboratorios, métodos de cálculo y, por supuesto, sistemas de instrumentación.

Los ingenieros civiles y, especialmente los dedicados a presas, somos conscientes que la sociedad nos exige, no solo que construyamos cada vez obras más atrevidas y económicas, sino que estas obras sean especialmente seguras.

La seguridad es un bien público exigible por el ciudadano, como lo puede ser la salud o la educación.

Pero proyectar y construir presas más seguras y económicas no es algo intuitivo y fácil, sino que es el producto de un estudio profundo, metódico y racional, donde la instrumentación juega un papel importante.

Conocer cómo reacciona y se comporta una estructura y su cimiento es algo que debe hacerse desde que la presa inicia su larga andadura, es decir, desde que se empieza a construir.

Así nos lo hemos planteado en España desde hace bastantes años, habiendo desarrollado métodos y técnicas de instrumentación que nos han permitido obtener conclusiones prácticas sobre el comportamiento de nuestras presas. Del enfoque dado a la misma para cumplir este objetivo es de lo que trata este artículo.

## 2. INSTRUMENTACION DE PRESAS. AUTOMATIZACION

Nosotros entendemos como instrumentación y control de presas un proceso contínuo, es decir, con una cadencia determinada en cuanto a obtención de datos que permita un análisis suficientemente rápido de los mismos por personal experto en este tipo de trabajos para obtener conclusiones suficientemente objetivas relacionadas con la seguridad de una presa, entendida, según indicaremos, como el conjunto estructura y cimentación.

Pensamos, además, que toda buena auscultación lleva consigo cuatro fases perfectamente diferenciadas pero íntimamente ligadas entre sí y que son:

- Proyecto de auscultación que incluye la definición de las magnitudes a medir, puntos de control, distribución de aparatos y fijación de sus rangos, precisión y sensibilidad.
- Selección de aparatos más idóneos y correcta instalación.
- Toma de datos según programas establecidos y variables en función de las distintas fases de la obra (construcción, puesta en carga y posterior explotación).
- Análisis e interpretación.

Creemos que el éxito de una buena auscultación depende principalmente de la experiencia de quien la proyecta, instala e interpreta, más que del sistema de medida utilizado. Este puede influir en la sensibilidad de las medidas o en la mayor o menor facilidad de su realización, pero la información final con conclusiones de orden práctico es consecuencia directa de la competencia técnica del equipo responsable y, por supuesto, de su dedicación.

Por último, estamos convencidos de que nunca se debe emitir un juicio crítico, favorable o desfavorable.

rable al comportamiento de una presa, sin haber realizado previamente una o más inspecciones detalladas de la misma y que estas inspecciones y comprobaciones deben ser hechas por los mismos ingenieros que tienen a su cargo el análisis e interpretación de datos.

Es decir, las distintas fases de la vida de una obra, proyecto, construcción, puesta en carga y posterior explotación, forman un conjunto único, continuo y sin posibilidad de ruptura, y todas y cada una de las fases deben analizarse como un todo. El conocimiento del comportamiento de la obra durante la fase de construcción debe de servir de arranque para programar la puesta en carga. El control de esta y la información que se recoja, deben fijar los aspectos que deben controlarse con especial cuidado durante el período de explotación, bien porque hayan presentado problemas especiales o bien porque sean los más significativos.

Vemos pues que con estos criterios, plantearse la idea de **automatizar** la totalidad de las operaciones (desde la toma de datos hasta la redacción final de las conclusiones prácticas que indiquen los problemas y puedan fijar la seguridad de una presa) es realmente difícil, o no conveniente al menos planteado a un nivel general.

Es cierto (como se indica en los cuadros preparados por el comité que estudia el deterioro de las presas y embalses) que existen aparatos cuya automatización hoy en día es fácil y en los cuales la transmisión de datos a distancia ha sido superada, pero también existen otros sistemas que controlan magnitudes esenciales para conocer el comportamiento de una presa en los cuales este proceso es de difícil automatización (entre otros, obtención de desplazamientos horizontales en presas de tierra mediante inclinómetros, poligonación o triangulación geodésica, movimientos verticales, etc.).

De acuerdo con todo esto, la instrumentación de una presa y su automatización futura la enfocamos según se indica a continuación:

### A) **Período de construcción (no automatizable)**

#### **Disponiendo:**

**Aparatos** fijos a obra, robustos, fáciles de instalar, proteger y leer, y además muy fiables pues las lecturas no siempre se pueden repetir en condiciones estables.

**Equipos móviles de lectura**, de fácil mantenimiento, robustos y con respuesta directa en la magnitud que deseamos controlar.

**Técnicos responsables de la instalación y**

**lectura**, debidamente preparados, ilusionados por su trabajo y capaces de seguir el ritmo de la obra y ajustarse a sus necesidades.

**Ingenieros cualificados**, que realicen análisis rápidos y vayan definiendo un modelo estructural adecuado y ajustable a la obra que se controla.

### B) **Período de puesta en carga (centralizable y mecanizable, pero no automatizable)**

En este período todos los aparatos son centralizados en zonas accesibles o galerías de visita si es posible en varios puntos que obliguen a los responsables de las lecturas a inspecciones periódicas por la presa.

Durante el mismo período, los ingenieros responsables deben haber mecanizado todo el tratamiento de datos, visitar la obra con frecuencia y realizar comprobaciones periódicas.

### C) **Período de explotación**

#### **Automatizable siempre en:**

- Presas construídas en zonas de difícil acceso en épocas determinadas, bien por condiciones climáticas u otras causas.
- Presas sometidas a variaciones fuertes en su régimen de explotación.

#### **De posible automatización parcial en:**

- Presas con problemas específicos, situadas en zonas sísmicas o construídas con materiales especiales, o con métodos avanzados todavía no debidamente contrastados.

#### **De automatización voluntaria en:**

- Presas sin problemas especiales y de características similares a otras sobre las cuales se poseen estadísticas suficientes para predecir su comportamiento.

**En todos los casos, la automatización no excluye la inspección periódica.**

## 3. **CRITERIOS SEGUIDOS AL PROYECTAR UNA INSTRUMENTACION**

Aunque cada presa constituye un caso particular como tal lo enfocamos, los criterios generales que se siguen al proyectar la instrumentación de una presa son los siguientes:

- 1.º La estructura y su cimentación forman un

## REFLEXIONES SOBRE LA INSTRUMENTACION DE PRESAS

conjunto único e indisoluble, y como tal debe controlarse. El tipo de presa y las características de su cimentación nos fijan los medios y las magnitudes a medir.

- 2.º Cualquier magnitud que se mida debe ayudar a la interpretación del conjunto de tal forma que el plan de vigilancia resulte armónico.
- 3.º La comprobación, tanto de la estabilidad de la presa y cimientos como de su comportamiento, debe verificarse en todas las fases de la obra (construcción, puesta en carga y posterior explotación).
- 4.º La distribución de todos los aparatos se realiza teniendo presente que la información de cada uno debe ayudar a la interpretación del conjunto sin recargar por ello el número de aparatos.

En caso contrario se encarecería el presupuesto, se haría el trabajo de interpretación más penoso y seguramente no mejoraría la información.

### 4. MAGNITUDES CONTROLADAS. EQUIPOS UTILIZADOS

De acuerdo con los criterios expuestos en capítulos anteriores, se prevén y distribuyen durante la fase de proyecto aparatos por el cuerpo de presa y cimientos, con objeto de obtener información suficiente sobre las siguientes magnitudes.

#### 4.1. Presas de hormigón

##### *Temperaturas para conocer:*

- Incrementos térmicos y temperaturas máximas alcanzadas durante el proceso de fraguado.
- Tiempo durante el cual se alcanzan estas temperaturas.
- Gradientes térmicos, tanto en sentido horizontal como vertical, que pueden originar tracciones con peligro de fisuración y alterar el sellado de las juntas de hormigonado (juntas entre tongadas consecutivas).
- Evolución térmica del hormigón de los bloques que forman las juntas para fijar las fechas más idóneas de inyección.
- Red de isotermas en algún bloque de acuerdo con la orientación del eje de la presa.
- Evolución térmica del agua a distintas alturas y del aire en algunos puntos del paramento de aguas abajo.

Para ello se han diseñado y utilizado dos tipos de termómetros: termopares de cobre-constantán y termómetros de resistencias de platino, ambos con lectura digital y fácilmente automatizables (ver fotos 1 y 2).

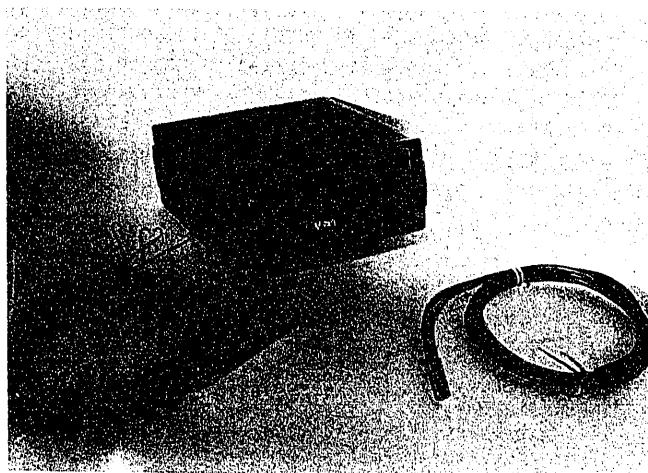


Foto 1.—Termómetros de cobre-constantán y aparato de lectura.

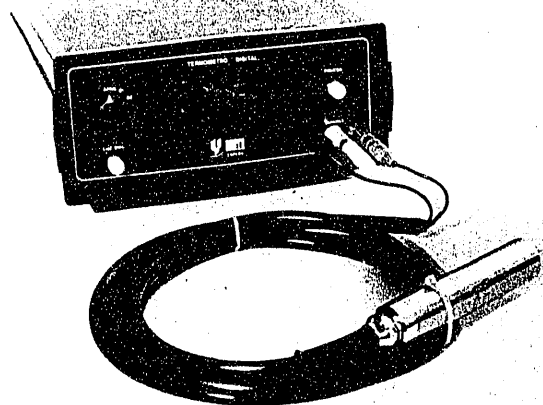


Foto 2.—Termómetros de resistencia de platino conectados al aparato de lectura.

##### *Comportamiento de las juntas de construcción para:*

- Conocer los desplazamientos relativos de los bloques mientras son independientes.
- Obtener información sobre el estado de apertura de las juntas hasta la ejecución de las inyecciones.
- Controlar las operaciones de lavado e inyección de estas juntas para conseguir la unidad estructural.

## REFLEXIONES SOBRE LA INSTRUMENTACION DE PRESAS

- Aportar elementos de juicio sobre la necesidad o conveniencia de realizar alguna reinyección posterior.
- Conocer durante la fase de construcción asientos diferenciales de la cimentación por cierre de diaclasas, pequeños reajustes, distinta deformabilidad, etcétera.

Para ello se utilizan dos tipos de aparatos, uno para control en superficie, bien en galerías o paramentos (foto 3) y otro en el interior de los bloques (foto 4). El primero es mecánico y el segundo electrónico y digital, fácilmente automatizable.

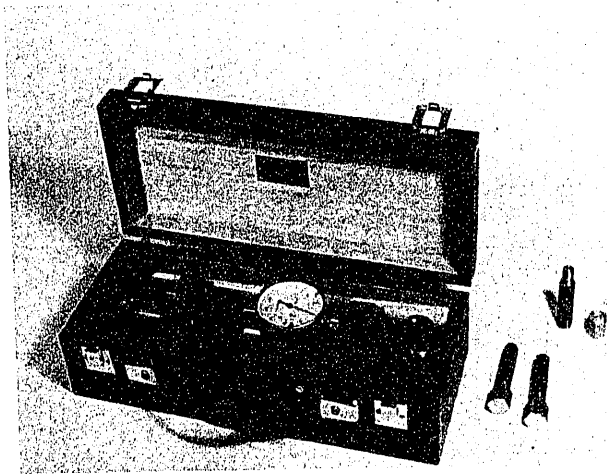


Foto 3.—Defómetro para control de juntas en superficie.

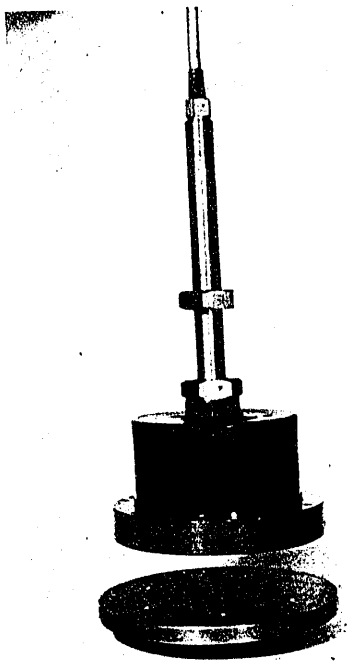


Foto 4.

Medidor de apertura de juntas electrónico para instalar en el interior de bloques.

*Comportamiento mecánico del hormigón de la presa, midiendo las deformaciones unitarias en puntos lo suficientemente representativos como para poder determinar:*

- Estado de esfuerzo en la estructura y su evolución en el tiempo.
- Red de isostáticas.

Para ello instalamos extensómetros de cuerda vibrante de lectura digital y fácilmente automatizables como los de la foto 5.

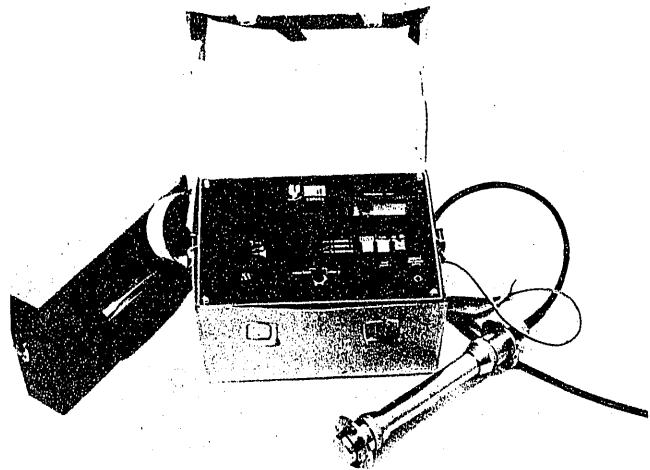


Foto 5.—Extensómetros de cuerda vibrante a colocar en el hormigón en masa y aparato de lectura.

*Movimientos de la estructura y su cimentación, para controlar:*

- Desplazamientos horizontales absolutos.
- Desplazamientos verticales absolutos.
- Posibles despegues a embalse lleno de la zona de contacto roca-hormigón o zonas más profundas.
- Deformabilidad de la cimentación en las zonas más cargadas a embalse lleno, detectando la forma real de trabajo de la cimentación y estabilidad de la misma.
- Influencia de las variaciones de las presiones intersticiales de la roca en los desplazamientos medidos en la estructura y su cimentación.
- Repetibilidad de los movimientos para condiciones semejantes, tanto térmicas como de presión hidrostática y subpresión.

Los aparatos más usados para este cometido son péndulos, tanto directos como invertidos, de lectura

directa (foto 6) y extensómetros de varillas (foto 7), fácilmente automatizables.

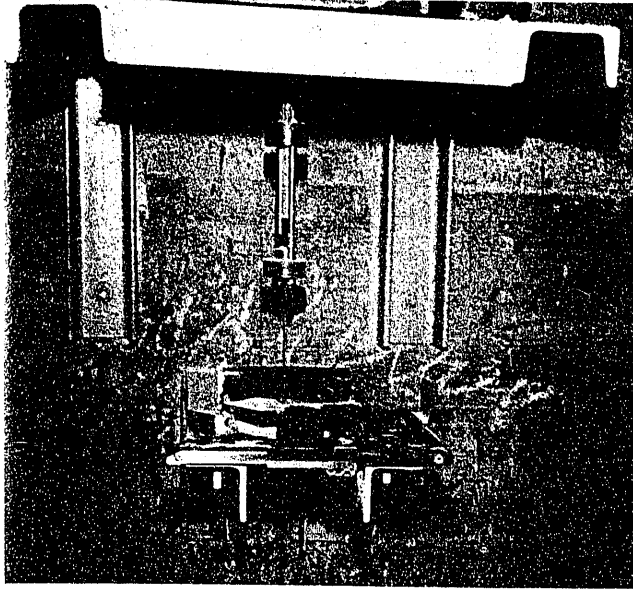


Foto 6.—Péndulo invertido con sistema de lectura directa.



Foto 7.—Extensómetro para cimientos con lectura directa o automática.

### *Subpresión para conocer:*

- Eficacia de la red de drenaje.
- Ley de subpresiones a lo largo de la base de los bloques, bien en la zona de contacto roca-hormigón o en zonas más profundas.
- Variaciones en la subpresión a lo largo de litoclasas que corten la cimentación en toda su longitud y que tuviesen salida aguas arriba de la presa.

Dos son los sistemas utilizados, bien realizando una auscultación hidráulica con piezómetros convencionales (foto 8), o de cuerda vibrante, más sensibles, de lectura digital (foto 9).

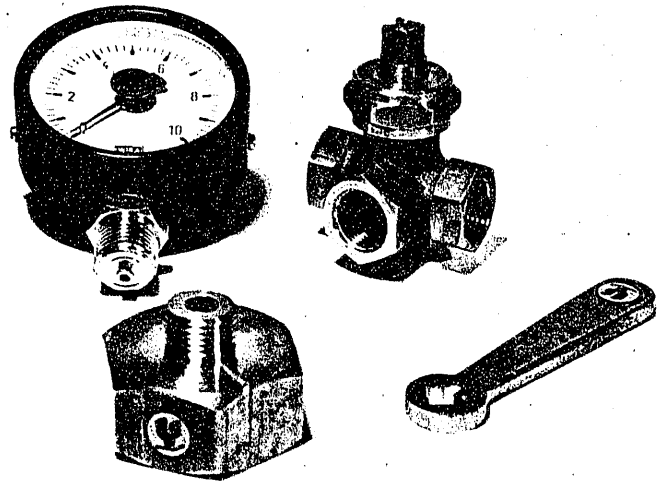
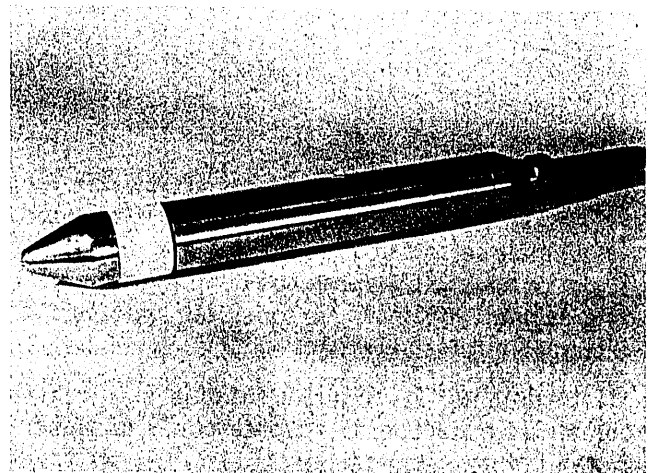


Foto 8.—Piezómetro convencional.

Foto 9.—Piezómetro de cuerda vibrante.



## REFLEXIONES SOBRE LA INSTRUMENTACION DE PRESAS

### *Filtraciones para conocer:*

- Caudal y su evolución en el tiempo.
- Posibles arrastres de material fino.
- Rotura de pantalla en alguna zona.

Todas estas magnitudes, como es lógico, son relacionadas con las variaciones de niveles de embalse o términos ambientales registrados en limnógrafos y termógrafos apropiados.

### 4.2. Presas de materiales sueltos

#### *Presiones intersticiales en cimientó, contacto núcleo-cimiento y núcleo para conocer:*

- Comportamiento del cimiento si sus caracterís-

ticas hacen pensar que el mismo juega un papel importante en la deformabilidad y resistencia del conjunto.

- Posibles filtraciones en el contacto núcleo-cimiento.
- Presiones intersticiales originadas durante el período de construcción y su disipación. Proceso de saturación.

Para ello se fabrican e instalan tres tipos de piezómetros: hidráulicos, neumáticos o de cuerda vibrante, seleccionando uno u otro de acuerdo con las ventajas e inconvenientes de cada tipo y que se resume en el cuadro I. Este cuadro se ha obtenido después de una larga experiencia en el uso de estos tipos de aparatos.

CUADRO 1

Características de los piezómetros neumáticos, hidráulicos y de cuerda vibrante

CARACTERISTICAS	PIEZOMETROS		
	Neumáticos	Hidráulicos	Cuerda vibrante
Factor volumétrico	Pequeño	Pequeño	Muy pequeño
Tiempo de respuesta	Corto	Corto	Muy corto
Rango	Depende del equipo de lectura	Depende del manómetro	Depende del elemento sensible
Sensibilidad	6/1.000 del rango	0,1 kg/cm <sup>2</sup>	1/1.000 del rango
Precisión	Depende del rango y del equipo de lectura	0,1 kg/cm <sup>2</sup>	1/1.000 del rango
Posibilidad de medir presiones negativas	No	Sí	Sí
Automatización	Compleja y cara	Compleja y cara	Fácil y económica
Tiempo requerido para el mantenimiento del equipo	Muy corto	Demasiado	Muy corto
Instalación	Fácil	Compleja	Fácil

### *Presiones totales para determinar:*

- Presiones transmitidas al cimiento.
- Presiones en algunos puntos del núcleo donde además se midan presiones intersticiales para poder realizar las oportunas comprobaciones en presiones efectivas en todas las hipótesis de carga.

Normalmente, los equipos usados son células neumáticas o de cuerda vibrante como la presentada en la fotografía 10.

### *Movimientos en líneas verticales y horizontales para:*

- Conocer la deformabilidad del cimiento, núcleo y espaldones, y determinar los posibles asientos diferenciales en sentido longitudinal y transversal.
- Profundizar en la relación existente entre asientos y presiones intersticiales y estudiar el proceso de consolidación del núcleo.
- Determinar los desplazamientos horizontales en distintos puntos de la estructura y cimiento.

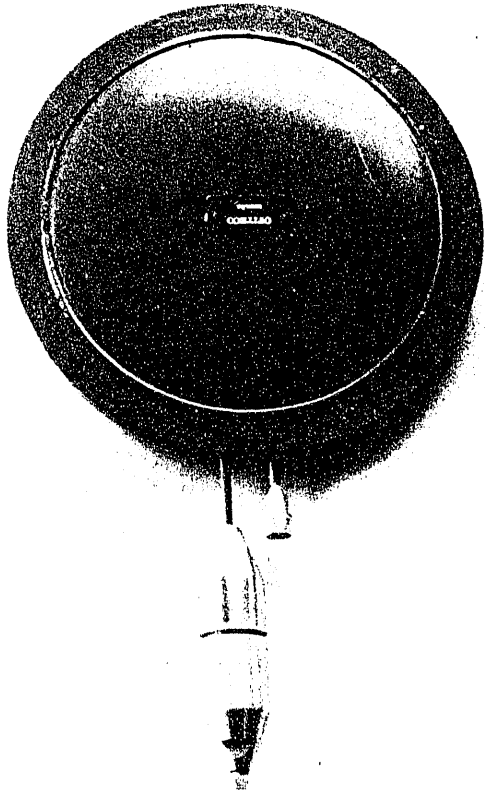
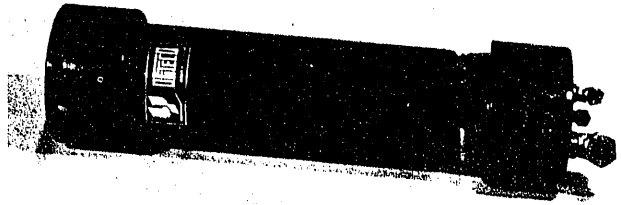


Foto 10.—Células de presión total (neumáticas o de cuerda vibrante).



(A)

Foto 12.—Medición de asientos por procedimientos hidráulicos:  
(a) célula, (b) paneles de lectura.

(B)

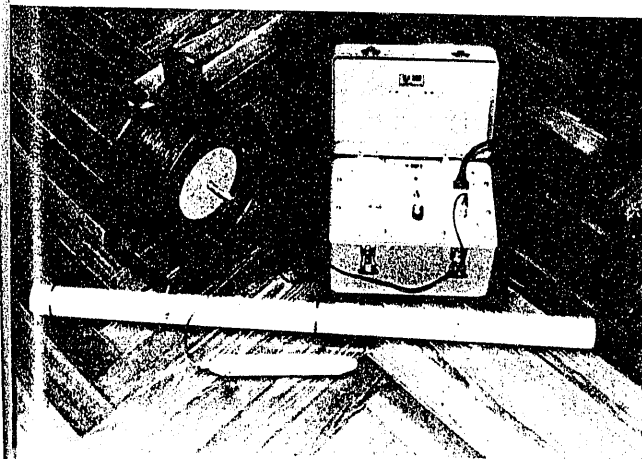
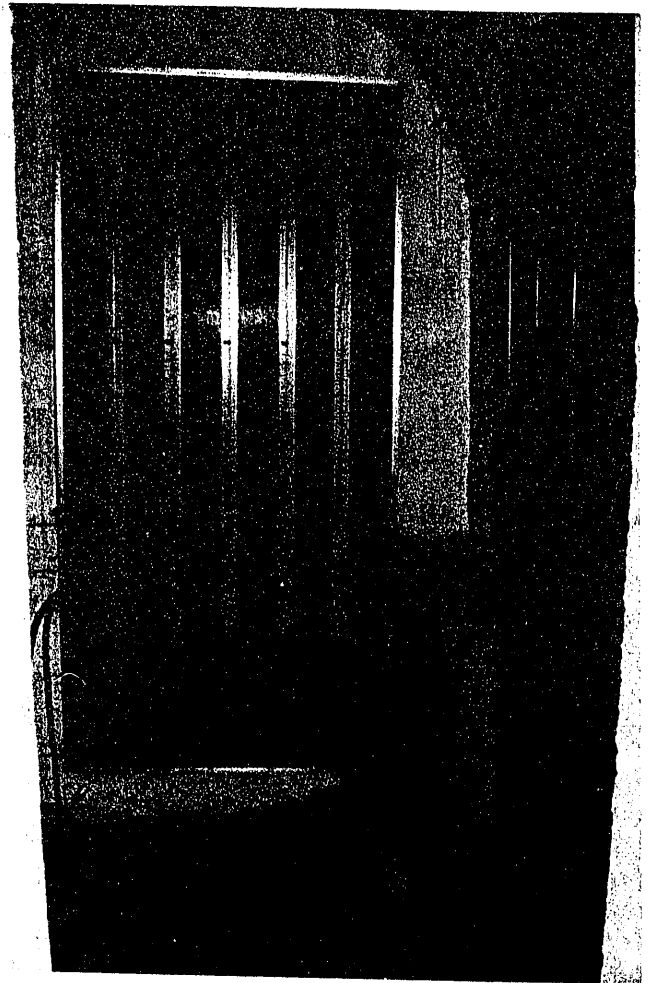


Foto 11.—Medidor electromagnético de asientos.

Para ello se utilizan inclinómetros y equipos para medición de asientos, bien electromagnéticos (foto 11) o hidráulicos (foto 12).

*Efectos dinámicos:*

Eventualmente y en algunos casos justificados por estudios de riesgo sísmico, se instalan equipos para determinar:

- Sismicidad inducida por el embalse.

— Respuesta de la presa y cimiento ante eventuales sismos.

Estos equipos, de diseño nacional como los anteriores, representan un avance muy importante en el estudio del comportamiento de nuestras presas ante fenómenos dinámicos. En las fotografías 13 y 14 pueden apreciarse un sismógrafo y un acelerógrafo con registro centralizado y directo

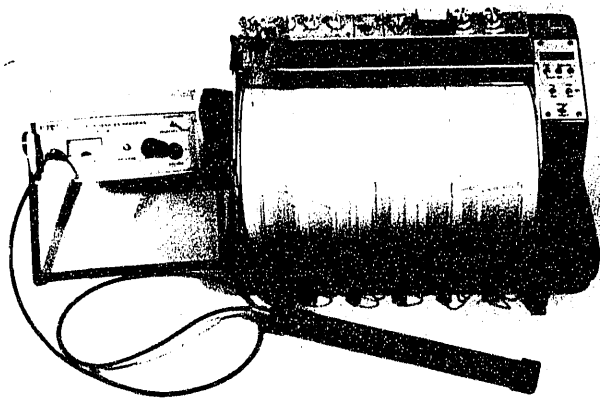


Foto 13.—Sismógrafo para estudio de microsismicidad y receptor de señales horarias.

### 5. CONCLUSIONES

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se puede concluir que:

1. En España se han desarrollado y existen métodos y técnicas de instrumentación de alta tecnología. Estos son fruto de nuestra larga experiencia en la construcción y explotación de presas y embalses.

2. Aunque entendemos que los avances de la electrónica facilitan en gran manera todo el proceso de toma, transmisión, archivo de datos y su análisis posterior, creemos que la automatización total solo debe realizarse una vez se conozca a fondo el comportamiento de la estructura y su cimiento, o bien en obras que presenten características especiales. Durante la construcción y primera puesta en carga, la toma de datos se realiza por personal especializado en contacto permanente con la obra.



Foto 14.—Acelerógrafo portátil.

Independientemente, y durante todo el proceso de instrumentación visitan la obra de forma periódica, comprobando y contrastando la información obtenida con su fiabilidad.

3. Pensamos que el éxito de una buena auscultación depende principalmente de la experiencia de quien la proyecta, instala e interpreta, más que del sistema de medida utilizado. Este puede influir en la sensibilidad de las medidas o en la mayor o menor facilidad de su realización, pero la información final con conclusiones de orden práctico es consecuencia directa de la competencia técnica del equipo responsable y, por supuesto, de su dedicación.