

AUSCULTACION DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS (*)

Por ANGEL PEREZ SAIZ
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director de OFITECO

En este artículo se presentan métodos y aparatos para medición de asientos, presiones intersticiales y totales en presas de materiales sueltos.

Se pretende con ello orientar al Ingeniero que proyecta, dirige o construye obras de este tipo sobre las ventajas e inconvenientes de los aparatos existentes y los factores que determinan su selección.

I. Introducción.

No vamos a destacar las causas por las cuales en nuestro país existe, hoy en día, una acusada tendencia a la construcción de presas de materiales sueltos (se han escrito excelentes artículos sobre el tema (1), (2)); ni la necesidad de construir en carreteras grandes rellenos artificiales que constituyen verdaderas presas de tierra por su altura y volumen.

Presas y rellenos artificiales, tanto en el período de construcción como en el de explotación, plantean importantes problemas al Ingeniero, exigiendo métodos de cálculo más avanzados, buena calidad de construcción y controles rigurosos.

En español, al margen del documento preparado por el Comité Internacional de Grandes Presas y traducido por nuestro Comité Nacional, no tenemos conocimiento de ningún artículo sobre auscultación de presas de materiales sueltos que trate el tema con la suficiente amplitud.

Aunque somos conscientes de nuestra limitación, pretendemos presentar métodos, técnicas y equipos para obtener datos representativos de aquellas magnitudes que influyen en la

estabilidad y comportamiento de las presas de materiales sueltos (tierra y escollera con núcleo impermeable) y permitan realizar, de acuerdo con las hipótesis de cálculo, las oportunas comprobaciones.

Al margen de la impermeabilidad necesaria en el caso de presas, a este tipo de obras de materiales sueltos se les exige dos requisitos fundamentales:

1. Deformabilidad adecuada para evitar asientos diferenciales fuertes.
2. Suficiente resistencia al deslizamiento, de acuerdo con las hipótesis de carga.

Los pliegos de condiciones suelen ser exigentes, y entre las características que deben reunir los materiales utilizados en el núcleo, la humedad de compactación ocupa un lugar preferente. Este factor influye decisivamente sobre la deformabilidad y resistencia, pues da lugar, en el caso de exceso de humedad, a presiones intersticiales altas durante la construcción o asientos importantes al saturarse si se compacta un suelo demasiado seco.

Ante estas dos alternativas, el "Bureau of Reclamation" de EE.UU. recomienda una humedad algo inferior a la óptima Proctor, controlada mediante los correspondientes ensayos, y si la importancia de la obra lo requiere, a instrumentar

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de octubre de 1973.

secciones escogidas para medir, por una parte, asientos, y, por otra, presiones intersticiales.

Por nuestra parte, incluimos la medición de presiones totales, pues aunque en los cálculos de estabilidad o de asientos, se admite que la presión total ejercida en un punto es $H \cdot \gamma$ (H = altura, γ = peso específico del material empleado); en realidad, no sabemos cuál es, porque el peso específico varía con el tiempo y con el modo de compactación. Por ello, y cuando el coeficiente de seguridad sea pequeño, es muy conveniente realizar las comprobaciones necesarias en presiones efectivas partiendo de las presiones intersticiales y totales medidas "in situ".

Vamos a ocuparnos, pues, de los diferentes métodos, técnicas y equipos para la medición de asientos, presiones intersticiales y presiones totales. Los desplazamientos horizontales no se incluyen en el presente trabajo, ni tampoco deformaciones unitarias y aceleraciones creadas en el caso de posibles seísmos que solamente interesan en obras particulares y no en la generalidad de las presas que se construyen.

Naturalmente tampoco vamos a ocuparnos, por realizarse en todas las ocasiones, del análisis y medida de las filtraciones.

II. Consideraciones generales sobre deformabilidad y resistencia.

Antes de especificar el control de las magnitudes mencionadas en I vamos a considerar algunos aspectos de la deformabilidad y resistencia que nos obligan a emplear métodos y técnicas diferentes.

Es sabido que la mayoría de los accidentes en presas se debieron a fenómenos de agrietamiento del elemento impermeabilizante. Por ello, es importante controlar este posible agrietamiento tomando las medidas oportunas a medida que la presa se va construyendo.

Como en la creación de grietas los asientos diferenciales juegan un papel importante, y en ellos puede influir la compresibilidad de la cimentación, es claro que ella debe tenerse en cuenta durante el proyecto y medirla durante la construcción y explotación, si es necesario.

De los distintos tipos de fisuras que pueden aparecer: transversales, longitudinales y horizontales, las más peligrosas son las primeras.

Las fisuras transversales son debidas a asientos diferenciales fuertes en sentido longitudinal, bien por falta de homogeneidad del material utilizado, distinta compactación y altura o compresibilidad del cimientto. Las zonas particulares de temer son aquellas en las cuales la pendiente de la cimentación cambia bruscamente por los grandes esfuerzos cortantes y tracciones que se crean.

La distinta deformabilidad en sentido transversal rara vez presenta problemas importantes durante la construcción, pues el gradiente de asientos suele ser pequeño, y, por consiguiente, los esfuerzos cortantes. En algunos casos extremos, cuando los cimientos son de alta compresibilidad, pueden aparecer fisuras longitudinales sin excesivo peligro para la estabilidad de la obra.

Otro tipo de fisuras longitudinales pueden aparecer en la pared de aguas arriba del núcleo después de la puesta en carga, y son, generalmente, de tracción; éstas han sido observadas en presas de escollera con núcleo de arcilla; parecen deberse a la mayor deformabilidad del espaldón de aguas abajo, que obliga al núcleo a desplazarse en esa dirección. Este tipo de fisuras es conveniente controlarlas, puesto que normalmente no son visibles.

Las fisuras horizontales pueden presentarse en presas con núcleo central y espaldones de escollera cuando aquél, por distintas causas, es más deformable que los espaldones y además el asiento de la parte inferior del núcleo se da lentamente. Estas grietas horizontales aparecen en la parte alta del núcleo, que materialmente se cuelga de los espaldones.

En cuanto a la resistencia, la zona de apoyo del relleno juega un papel importante, ya que influye en las líneas de rotura que se puedan crear y, por tanto, en el tipo de auscultación (superficial o profunda).

Si el relleno descansa sobre un medio cuya resistencia al esfuerzo tangencial es superior al de aquél, las superficies de desplazamiento vienen limitados por la de excavación y la auscultación lógicamente, se debe realizar en el cuerpo del relleno. En el caso de que las características resistentes sean similares, la cimentación a efectos de control, debe ser considerada como el resto del material, pues influye, no sólo sobre los taludes necesarios, sino sobre el equipo aconsejable.

Estas ideas generales deben tenerse en cuenta en el momento de proyectar el sistema de auscultación, ya que éste dependerá de aquellos factores que condicionarán el posible comportamiento de la obra.

III. Medición de presiones intersticiales. Tipo de piezómetros.

Tanto en presas de tierra como de escollera con núcleo impermeable, se necesita conocer la distribución de las presiones intersticiales en las distintas hipótesis para las cuales la estabilidad se estudia: construcción, embalse lleno y desembalse rápido. Quizá puedan exceptuarse las presas de escollera con núcleo inclinado, en las cuales la estabilidad a embalse lleno casi puede asegurarse y su comprobación suele ser formularia (1).

Ya hemos comentado en I que las presiones intersticiales que se crean al consolidar un suelo son función de la humedad de compactación empleada. Pero, además de este factor, influyen las tensiones capilares, el drenaje existente y, por supuesto, el tipo de suelo empleado.

Generalmente, el cálculo del coeficiente de seguridad de una obra de tierra durante la construcción, se suele efectuar suponiendo que el valor $u/\gamma h$ (u = presión intersticial, h = altura de relleno) se mantiene dentro de unos límites más o menos fijos. Esto, como es lógico, no es fácil de conseguir, siendo por tanto muy útiles los datos que se obtengan de las mediciones directas.

Los piezómetros, instalados en la masa del relleno, indicarán si las presiones intersticiales son más altas de lo previsto, con la consiguiente disminución del coeficiente de seguridad y posible rotura, lo cual obligaría a tomar medidas, bien bajando la humedad de compactación o bien dando tiempo a que se vayan disipando las presiones intersticiales, aumentando las capas drenantes o disminuyendo el ritmo de construcción.

El cálculo de estabilidad, en el caso de desembalse rápido, se realiza partiendo de conocimiento del estado de las presiones intersticiales antes del desembalse y determinando el incremento de las mismas por variación de las presiones totales. En este caso de desembalse rá-

pido son también muy útiles las mediciones *in situ* para realizar las oportunas comprobaciones.

Las presiones intersticiales han sido estudiadas en los últimos diez años, principalmente, por el "Bureau of Reclamation" de EE.UU. y el "Imperial College" de Londres. Consecuencia de este estudio es el gran número de piezómetros distintos existentes hoy en día, que en realidad pueden agruparse en los siguientes:

- Piezómetros convencionales o de tubo abierto.
- Piezómetros tipo Casagrande.
- Piezómetros hidráulicos.
- Piezómetros neumáticos.
- Piezómetros eléctricos.
- Piezómetros de cuerda vibrante.

La elección de un tipo u otro depende, fundamentalmente, del tiempo de respuesta, es decir, del tiempo transcurrido desde que se produce un incremento de presión hasta que es detectado por el sistema de medida. Este tiem-

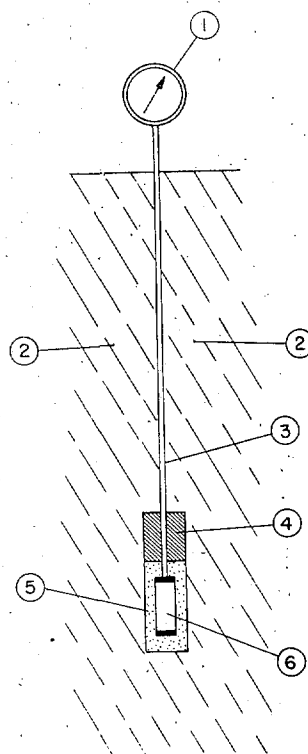


Fig. 1. — Piezómetro tipo Casagrande con manómetro en cabeza. 1, manómetro; 2, núcleo; 3, piezómetro; 4, tapón de arcilla; 5, filtro; 6, pieza porosa.

po, que ha sido estudiado por Gibson y Hvorslev, depende de tres factores:

- Permeabilidad del suelo.
- Coeficiente volumétrico, definido como el volumen de agua que debe penetrar en el aparato para que indique una variación de presión igual a la unidad.
- Características geométricas del filtro.

a) *Piezómetros convencionales.*

Estos piezómetros están formados por un tubo metálico o de materia plástica con una superficie filtrante en su base.

Es, por supuesto, el tipo más económico y utilizado, aunque sus resultados en suelos de baja permeabilidad son totalmente inaceptables. Para que acuse una variación de presión debe penetrar cierta cantidad de agua en el tubo, lo cual lleva consigo que su tiempo de respuesta sea muy alto.

Este tiempo puede alcanzar fácilmente un mes para un tubo de 7 mm de diámetro interior en un suelo con un coeficiente de permeabilidad del orden de $2,5 \times 10^{-8}$ cm/s. (8).

b) *Piezómetros tipo "Casagrande".*

Se basan en el mismo principio que los anteriores, pero reemplazando la superficie filtrante por una piedra porosa y en algunos casos instalando un manómetro en la cabeza. El diámetro del tubo utilizado es muy pequeño y está comprendido entre 7 y 15 mm.

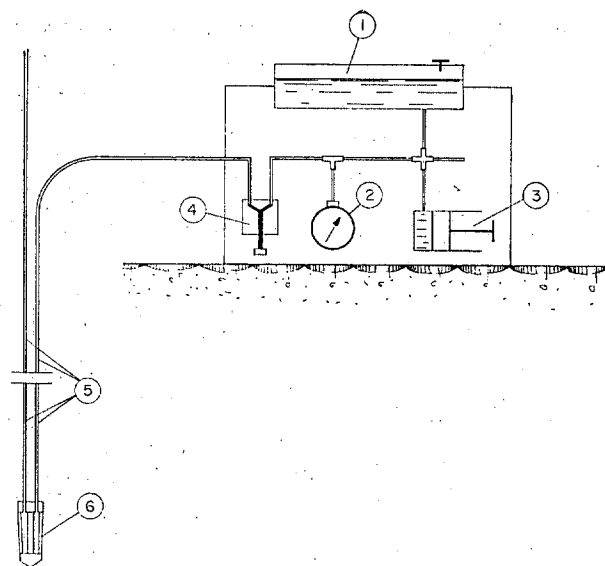


Fig. 2. — Representación esquemática del piezómetro hidráulico de doble tubo con el sistema de lectura: 1, depósito de agua; 2, manómetro; 3, émbolo para suministrar contrapresión; 4, indicador de cero; 5, tubos de P.V.C.; 6, piedra porosa.

El tiempo de respuesta de este piezómetro es más corto que en los convencionales, pero sus resultados siguen siendo de poca garantía, para las necesidades reales en presas de materiales sueltos.

c) *Piezómetros hidráulicos.*

En este tipo, la presión del agua en el punto de medida se transmite a un manómetro de precisión por intermedio de un líquido (agua o

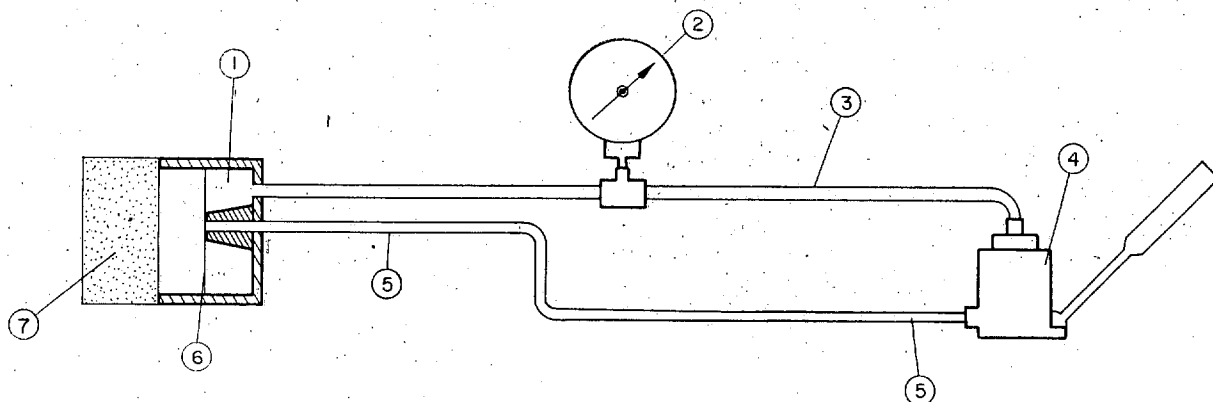


Fig. 3. — Esquema del piezómetro neumático. 1, cámara de equilibrio; 2, manómetro; 3, conducto de ida; 4, compresor; 5, conducto de retorno; 6, diafragma; 7, piedra porosa.

aceite). Normalmente llevan dos tubos para poder purgar el conjunto.

Estos piezómetros suministran mejores resultados que los convencionales y tipo Casagrande. Tienen el inconveniente de que donde se instalan manómetros y dispositivos de presión requieren instalaciones complejas y delicadas interfiriendo normalmente en la marcha de la construcción.

En la figura 2 se esquematiza un piezómetro de este tipo.

d) Piezómetros neumáticos.

Constan de una cámara de equilibrio en la que se ha incorporado un diafragma que abre o cierra la conexión entre dos tubos, los cuales alcanzan la superficie donde se realizan las operaciones necesarias para medir la presión intersticial.

El principio de medida es el siguiente (ver figura 3): La presión intersticial (u) que queremos medir, cierra el conducto 4 de retorno; si accionamos una bomba transmitimos una determinada presión a través del conducto 3, hasta el hueco 2 de la cámara de equilibrio, obligando a que el diafragma (1) se separe estableciendo comunicación entre 3 y 4 de una forma regular. En estas condiciones, la presión medida en el manómetro debe ser la misma que la presión intersticial. Normalmente, el fluido utilizado es gas; aunque en algunos tipos se utiliza también agua u otro líquido.

Estos piezómetros, por trabajar prácticamente a volumen constante, son bastante sensibles y sus resultados, si son debidamente tratados, pueden considerarse aceptables. Plantean, no obstante, problemas de realización de lecturas por el mismo principio de medida.

e) Piezómetros eléctricos.

El funcionamiento de estos piezómetros es el siguiente: El agua intersticial penetra en el piezómetro a través de una piedra porosa deformando una membrana muy sensible; esta deformación, que es proporcional a la presión intersticial, se mide mediante extensómetros eléctricos (strain gauges).

Aunque son muy sensibles y su respuesta casi instantánea, presenta problemas de aislamiento y su fiabilidad a largo plazo no es buena.

f) Piezómetros de cuerda vibrante.

Su funcionamiento es similar a los eléctricos; la membrana que se deforma con la presión del agua hace cambiar la tensión de un hilo cuya frecuencia de vibración cambia a su vez.

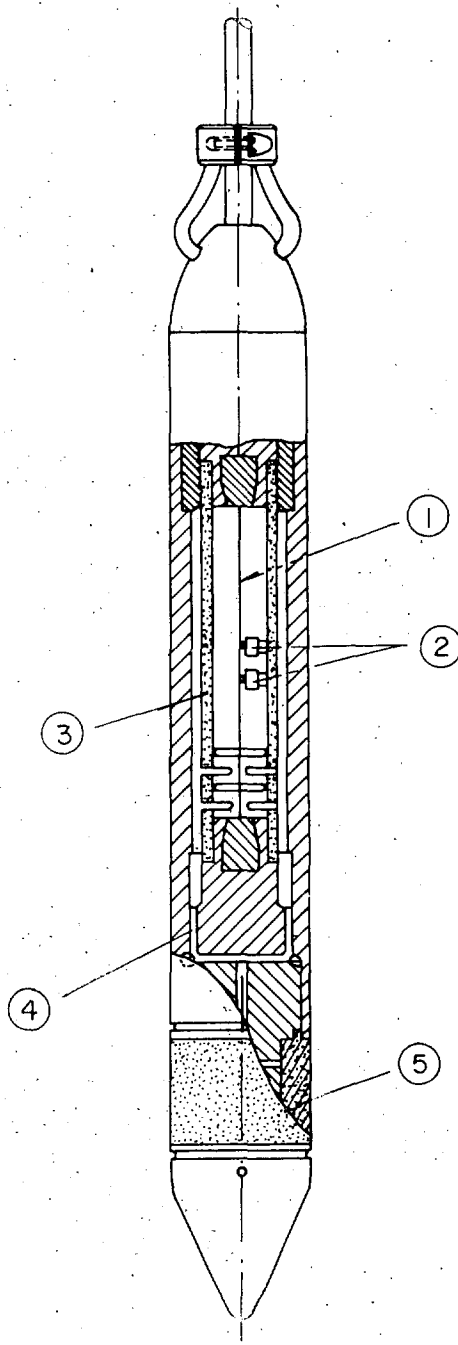


Fig. 4. — Esquema de piezómetro de cuerda vibrante. Telemac (Francia). 1, cuerda vibrante; 2, bobinas para excitación de hilo; 3, tubo de acero flexible; 4, diafragma; 5, piedra porosa.

Estos piezómetros están demostrando que sus resultados son de gran fiabilidad, ya que presentan las siguientes ventajas:

- Tiempo de respuesta muy corto (prácticamente instantáneos).
- Gran precisión y sensibilidad.
- Gran fidelidad.
- Buen funcionamiento en suelos de baja permeabilidad donde los flujos de agua son pequeños.

Aunque son más caros que otros tipos, su uso se va generalizando, pues los resultados, de total garantía que se obtienen, contrarrestan aquel inconveniente. Son además fáciles de instalar y de leer, admitiendo centralización incluso con control automático sin excesivos problemas.

En la figura 4 se presenta un esquema del piezómetro fabricado por Telemac (Francia).

IV. Medición de asientos.

Al margen de los métodos topográficos, son varios los que normalmente se utilizan para la determinación de asientos. Convencionalmente y en función del principio de medida empleado, los dividiremos en:

- Procedimientos mecánicos.
- Procedimientos electromagnéticos.
- Procedimientos eléctricos.
- Procedimientos hidráulicos.

a) Medición de asientos utilizando procedimientos mecánicos (Crossarm).

Este tipo de mediciones, de gran sencillez y suficiente precisión, se emplean cuando se quieren determinar asientos respecto a la cota "0" (superficie final de excavación), así como relativos entre puntos de una misma vertical.

Consiste en una serie de tubos telescópicos que, a distancias previamente fijadas, llevan uniones angulares que se desplazan formando un todo con el suelo.

Para determinar la situación de una serie de puntos previamente establecidos, se introduce una sonda, que lleva incorporadas unas aletas abatibles; las aletas de esta sonda se cierran al

alcanzar el punto más bajo, permitiendo su extracción y utilización posterior.

Este sistema ha demostrado ser muy eficaz, por lo que ha alcanzado gran difusión; su precisión es suficiente y no presenta prácticamente averías, siendo además muy barato.

En la figura 6 se presenta esquemáticamente el utilizado por OFITECO (España).

b) Medición de asientos utilizando procedimientos electromagnéticos.

Si el cimientto es fuertemente compresible y, por tanto, se esperan asientos importantes por esta causa, es conveniente determinar, no sólo los asientos respecto a la superficie final de excavación, sino respecto a capas más profundas. En este caso el procedimiento se esquematiza en la figura 5.

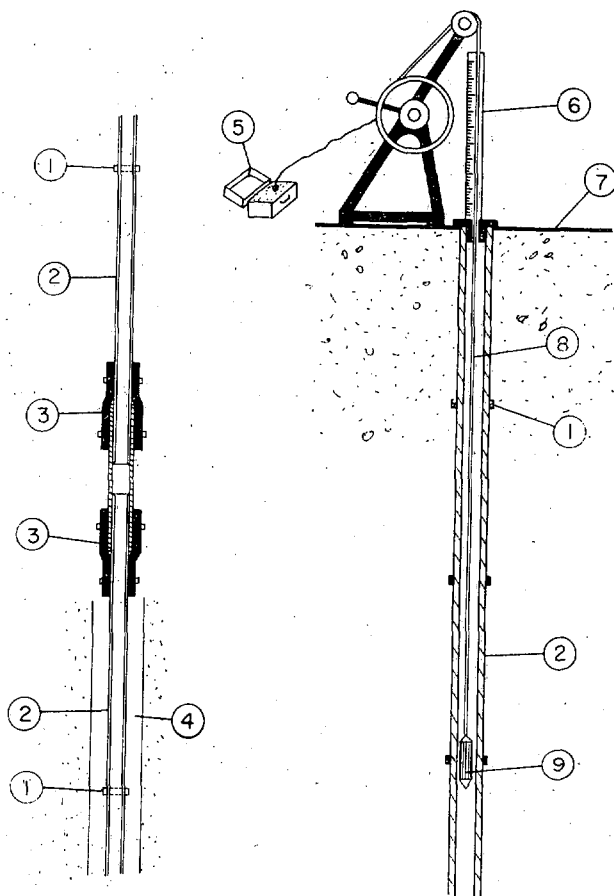
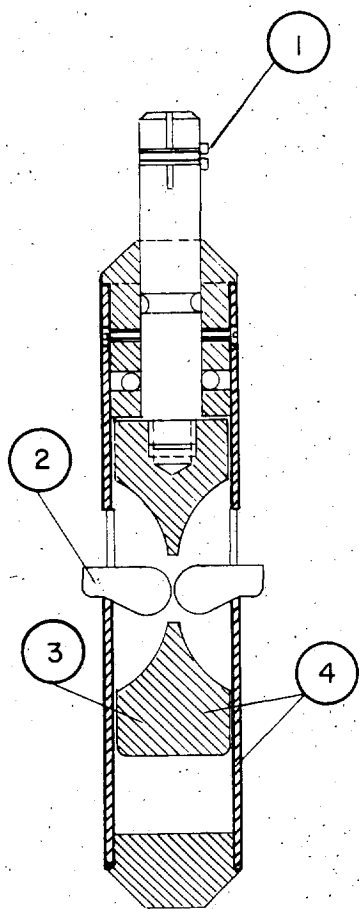


Fig. 5. — Medición de asientos mediante procedimientos electromagnéticos. 1, anillo metálico; 2, tubo de P.V.C.; 3, manguitos para unión de tipos; 4, taladro; 5, aparato de lectura; 6, escala graduada; 7, superficie relleno o cimentación; 8, cable graduado; 9, detector electromagnético.



TORPEDO OFITECO (ESPAÑA)
PARA CONTROL DE ASIENTOS

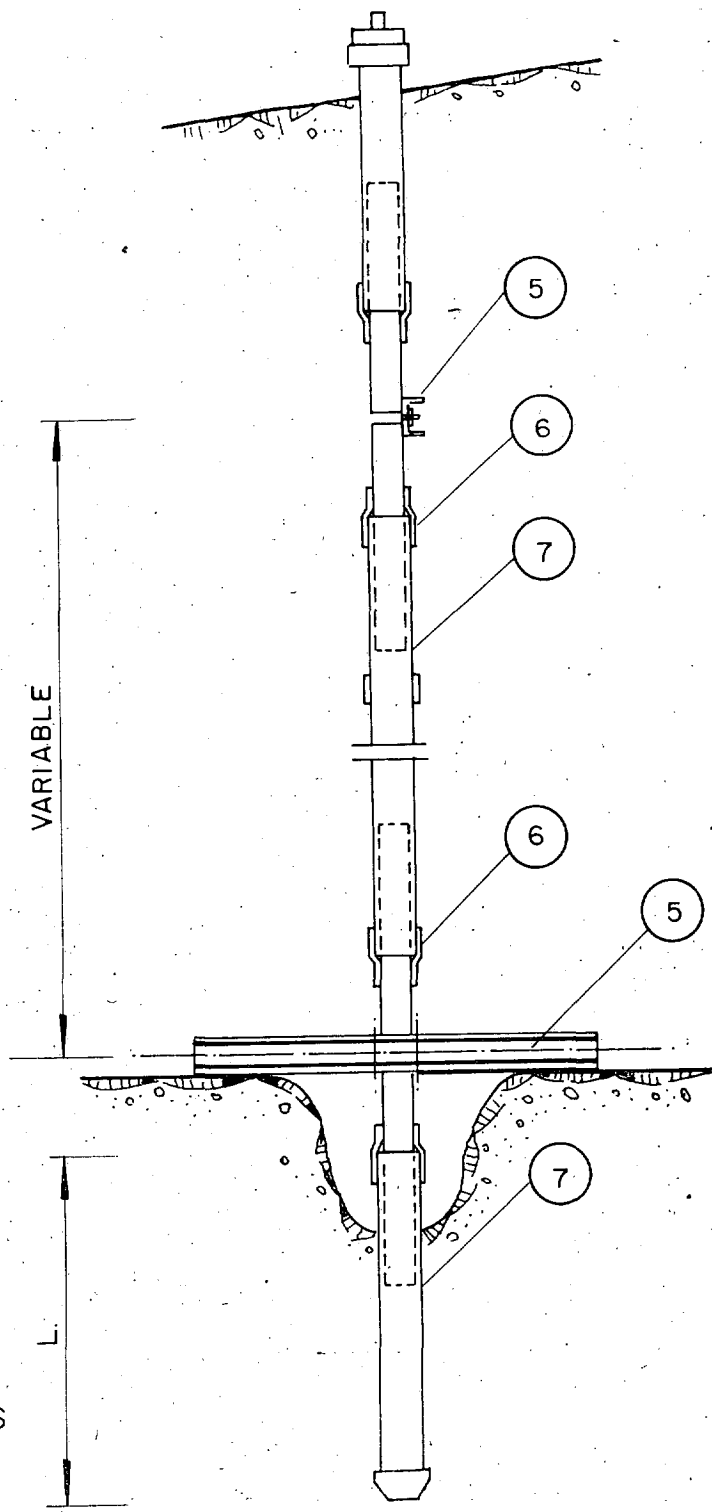


Fig. 6. — Tubos telescópicos para medición de asientos (Crossarm). 1, punto de fijación de la cinta graduada; 2, aleta abatible; 3, masa deslizante; 4, acero inoxidable; 5, angular; 6, manguito; 7, punto de medida.

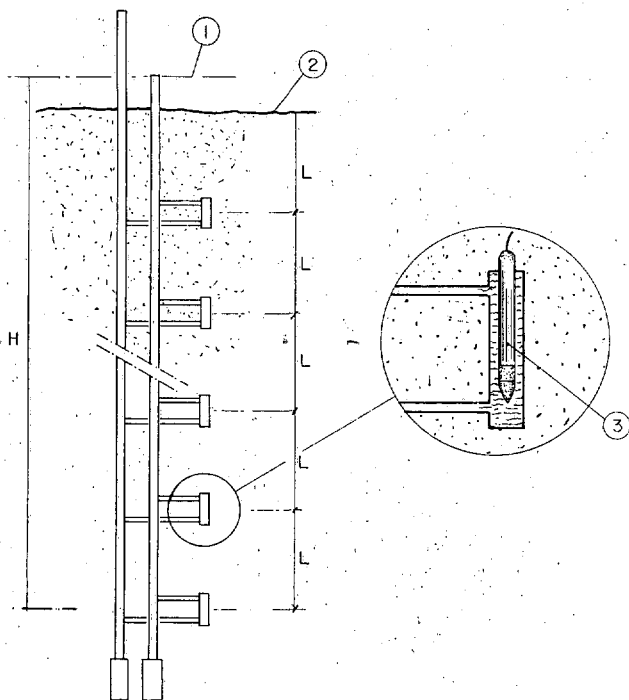


Fig. 7. — Medición de asentamientos mediante procedimientos electroacústicos. 1, nivel de agua; 2, superficie relleno; 3, cápsula manométrica de cuerda vibrante.

Consiste en realizar en el cemento un taladro de diámetro determinado. Dentro de este taladro se introducen tubos de P.V.C. de menor diámetro, unidos por manguitos telescópicos; estos tubos llevan incorporados anillos metálicos.

Antes de iniciar la compactación de las capas del relleno, se introduce arena entre el tubo y el taladro y se compacta en toda la altura hasta formar un todo que sufra los mismos asentamientos que el cemento.

La posición de los anillos metálicos se determina con gran precisión, haciendo descender un detector electromagnético sujeto al extremo de un cable graduado.

c) Medición de asentamientos utilizando procedimientos eléctricos.

Este procedimiento, que se esquematiza en la figura 7, consiste simplemente en determinar, mediante cápsulas manométricas, la altura H , que separa las mismas de un nivel determinado exterior.

La precisión que se obtiene con este sistema es muy grande y la ejecución de lecturas có-

moda y rápida. Presentan, sin embargo, la desventaja de su alto precio, puesto que las cápsulas de cuerda vibrante, idénticas a las especificadas al hablar de los tipos de piezómetros, hacen el sistema más caro que los anteriores.

d) Medición de asentamientos utilizando procedimientos hidráulicos.

Están basados en el principio de los vasos comunicantes y nos determinan los asentamientos relativos entre diferentes puntos de una misma horizontal.

El procedimiento consiste en llenar de agua algunos depósitos fijos o bien un depósito móvil (telenivel) que se mueve dentro de un tubo horizontal permitiendo determinar la cota de puntos de esta recta mediante otro depósito accesible.

En la figura 8 puede verse un esquema cuando se emplea un telenivel. Este está formado por un recipiente de 60 mm de diámetro que lleva un tubo para alimentación de agua y un alivadero. Un torno instalado en un sitio accesible permite, mediante un cable de vaivén, el movimiento del telenivel (en algunos tipos éste puede ser de cuerdas vibrantes).

En la figura 9 se esquematiza otro de los sistemas hidráulicos.

Estos procedimientos determinan asentamientos a lo largo de una horizontal, permitiendo establecer la relación entre asentamientos y presiones intersticiales en varios puntos de esta recta. Interfieren muy poco en el ritmo de construcción y su uso combinado con otros métodos, puede ser conveniente.

V. Medición de presiones totales.

Una de las variables que intervienen en el cálculo de la estabilidad, en la hipótesis de desembalse rápido, es la variación de tensiones totales introducidas por el desembalse, cuando el núcleo está formado por un material compresible. Este tema ha sido claramente expresado por V. Escario (3) y no vamos a comentarlo.

Sin embargo, si queremos indicar que puede ser conveniente, dados los bajos coeficientes de seguridad que se admiten, medir directamente in situ las tensiones totales verticales y su evolución a lo largo del tiempo.

Fig. 8. — Sistema hidráulico con telenivel para medición de asientos. 1, base graduada; 2, polea; 3, cable; 4, conducto de agua; 5, depósito; 6, punto de medida; 7, tubo de plástico; 8, torpedo.

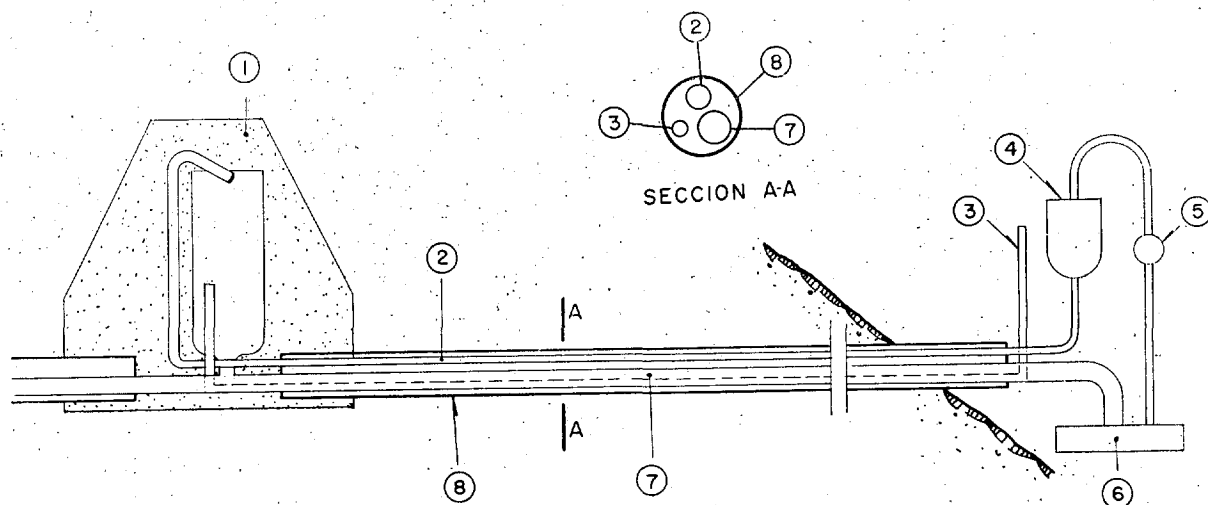
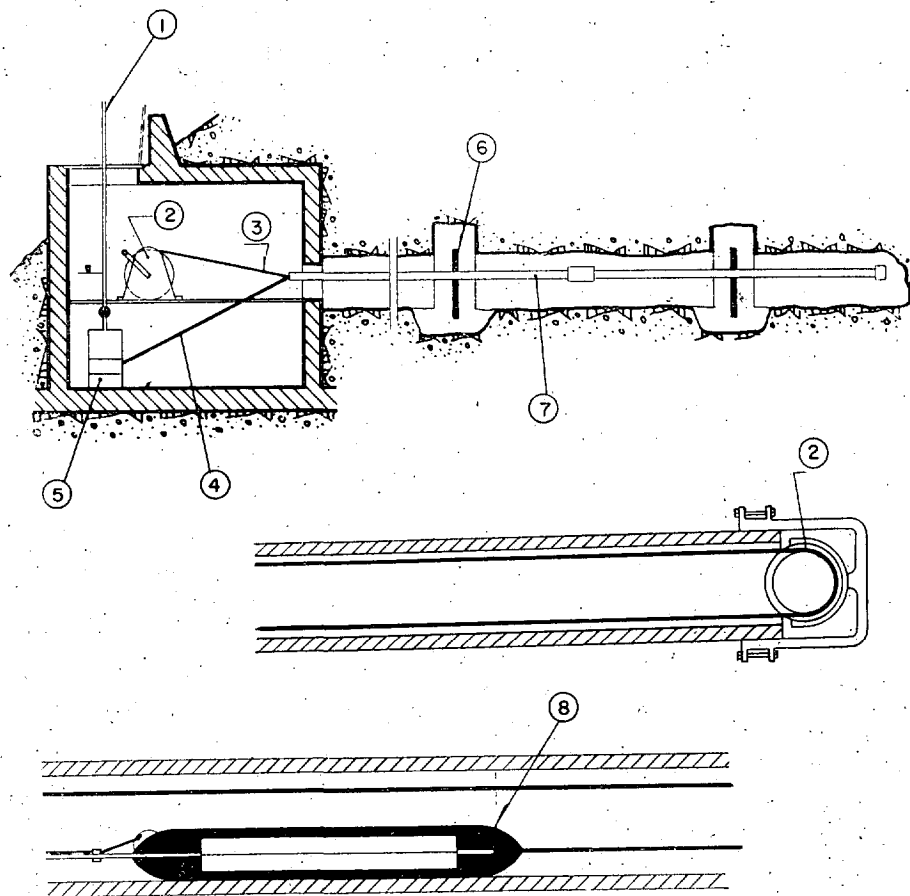


Fig. 9. — Esquema del sistema hidráulico para medición de asientos, según el principio de los vasos comunicantes. 1, macizo de hormigón; 2, conducto de agua de ida; 3, conducto de aireación; 4, nivel de lectura; 5, bomba; 6, depósito; 7, conducto de agua retorno; 8, tubería de protección.

La medida de estas tensiones, aunque no es fácil, hoy en día puede intentarse con cierta garantía. Los factores que influyen en estas mediciones son:

- Las discontinuidades que el aparato introduce en el medio que queremos controlar.
- El efecto bóveda, que para tensiones débiles puede ser importante.

Los tipos de aparatos existentes para control de tensiones en obras de materiales sueltos son:

- Células de presión con sistema eléctrico o de cuerda vibrante, y
- Células de presión con sistema hidráulico.

Las células de presión eléctrica o de cuerda vibrante, llevan un diafragma deformable que hace cambiar la relación de resistencia de un elemento sensible o la frecuencia de vibración de un hilo. Las ventajas e inconvenientes de uno u otro son las mismas que ya indicamos al hablar de piezómetros basados en principios similares.

El profesor Carlson patentó una célula de resistencia eléctrica que ha sido bastante utilizada. Un corte esquemático de esta célula se aprecia en la figura 10.

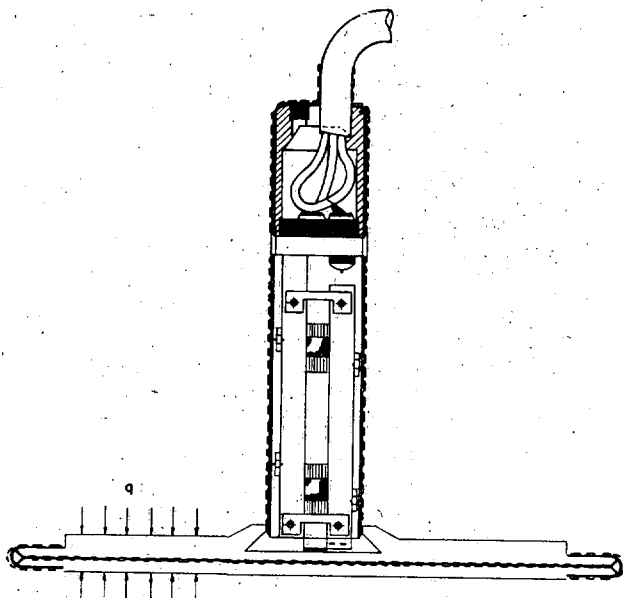


Fig. 10. — Célula tipo Carlson para medición de tensiones totales.

Posteriormente ha sido desarrollada una célula de presión cuyo principio de funcionamiento es hidráulico, célula tipo Glotz, comercializada en gran número de países (Alemania, Austria, Estados Unidos, Francia, etc.).

Nota final.

Las ideas expresadas en este artículo, todas de carácter general, sólo pretenden, como hemos indicado, orientar al ingeniero que proyecta, dirige o construye una presa.

Es importante señalar que el éxito de una buena auscultación depende principalmente de la experiencia de quien la proyecta, instala e interpreta, más que del sistema utilizado. Este influye en la precisión de las medidas, pero la información final obtenida con conclusiones de orden práctico es consecuencia directa de la competencia técnica del equipo responsable y por supuesto de su dedicación.

BIBLIOGRAFIA

1. J. A. JIMENEZ SALAS y V. ESCARIO: "Evolución de las presas de materiales sueltos en España". R.O.P., abril 1964.
2. A. ALVAREZ y J. M. PEIRONCELY: "Experiencia española en el proyecto de las presas de materiales sueltos". R.O.P., mayo 1970.
3. V. ESCARIO: "Estabilidad de presas de tierra y escollera". Monografía núm. 1 del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo.
4. S. URIEL: "Algunos aspectos de la cimentación de presas de materiales sueltos". R.O.P., mayo 1970.
5. Comité Internacional de Grandes Presas: "Consideraciones generales sobre la auscultación de presas de tierra y escollera". Publicado por el Comité Nacional Español.
6. A. PEREZ SAIZ: "Mediciones *in situ* mediante equipos para control remoto y continuo". Conferencia pronunciada en la Dirección General de Carreteras con motivo de la celebración del Segundo Cursillo de Geofísica.
7. A. PEREZ SAIZ: "Cálculo tensional de presas bóveda obtenido a partir de mediciones realizadas *in situ*". R.O.P., enero 1970.
8. Laboratoires des Ponts et Chaussées: "Etude des remblais sur sols compressibles". E. Dunod.

9. M. BARGE M. M. POST y HUYNH: "Auscultation de la dique de Serre-Ponçon". El Octavo Congreso de Grandes Presas. Edimburgo, 1964.
10. Groupe de Travail du Comité Français des Grands Barrages: "Auscultation des Barrages d'Electricité de France lors de leur première mise en charge". X Congreso de Grandes Presas. Montreal, 1970.
11. H. JOSSEAUME: "Facteurs intervenant dans les mesures de pression interstitielle".
12. J. SHERARD, R. WOODWARD, S. GIZIENSKI y W. CLEVINGER: "Earth and Earth-Rock dams". John Wiley and Sons Inc. New York.
13. J. LOWE: "Recent Development in the design and rockfill dams". X Congreso de Grandes Presas. Montreal, 1970.
14. J. F. CAPELLE, O. DASCAL and G. S. LAROCQUE: "Behaviour of the Main Outcrops Dam during Construction and Impounding of the Reservoir" World Dams Today, 1970.
15. S. D. WILSON and W. HANCOCK: "Instrumentation for movements Within Rockfill Dams".
16. S. B. WILSON: "Investigation of embankment Performance". Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE paper, 5311, July 1967.
17. U.S. Bureau of Reclamation: "Earth Manual".
18. R. J. MARSAL and L. RAMIREZ DE ARELLANO: "Performance of El Infiernillo Dam 1963-1966". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 5318, July 1967.
19. M.O.P., Dirección General de Obras Hidráulicas: "Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de grandes presas".
20. Folletos de OFITECO (España), TELEMAT (Francia) y SLOPE INDICATOR (EE.UU.).