

# LAS GRANDES PRESAS Y EL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS

Dr. Ing. C. C. P. C. BENITO VOCAL

Dr. Ing. C. C. P. J. A. JIMENEZ SALAS VOCAL

Dedicado el presente número de la REVISTA DE OBRAS PUBLICAS a presentar las principales aportaciones españolas de estos últimos años a los problemas relacionados con las grandes presas, parece oportuno presentar un resumen de las actividades de los organismos integrados en el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, reduciendo éstas exclusivamente a los temas directamente relacionados con aquéllos.

\* \* \*

En el proyecto, construcción y explotación de las grandes presas se presenta un elevado número de problemas técnicos con los que podemos formar tres grandes grupos, según tengan unas características esencialmente mecánicas, hidráulicas o mixtas.

En el primer grupo pueden incluirse todos los relacionados con el plexo tensional del conjunto presa-laderas y su interrelación. Es natural que estos problemas de acuerdo con la naturaleza o las características resistentes de las laderas y el valle, conduzcan a soluciones totalmente distintas, que llevarán a concepciones formales muy diferentes y a la realización de diversos tipos de presas según los materiales disponibles.

Si bien es cierto que en todas las obras de ingeniería civil el terreno juega un papel importante, es, sin duda, el campo de las obras hidráulicas, y en especial el de las presas, donde la morfología y propiedades de los suelos presentes en la cerrada y en el embalse (si se trata de una obra de fábrica) o el conocimiento de los materiales disponibles (si la presa es de tierra o escollera) ejercen un influjo decisivo en su concepción, proyecto y construcción.

Merece destacarse el avance de la Mecánica de las Rocas, prácticamente nacida con la década. Tal avance es debido, en gran parte, a la exigencia de un conocimiento más preciso del comportamiento de los medios rocosos, frente a las solicitaciones de las presas, cada vez de mayor importancia, y ante la necesidad de aprovechar cerradas constituidas por terrenos de características geotécnicas pobres o mal conocidas.

La investigación sistemática de las propiedades del medio rocoso de apoyo de las presas de fábrica ha sido impulsada por el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, con la introducción y perfeccionamiento, en España, de los ensayos *in situ* de muy variado tipo y dimensión. Los ensayos de corte directo, para la deter-

minación de la resistencia al esfuerzo tangencial de la roca matriz o de las litoclasas; las pruebas de deformabilidad mediante cargas con placa; los ensayos directos de permeabilidad *in situ*, etc., han sido objeto de atención preferente, y han constituido temas de continua ocupación de la Sección de Mecánica del Suelo, que, entre otras, ha estudiado las cimentaciones de las siguientes presas: Guadalhorce-Guadalteba, El Grado I, El Grado II, Mequinenza, Canelles, Ribarroja, Tajo de la Encantada, El Renegado, La Viñuela, Iznájar, Santamora, El Atazar, Beleña y Aríñez.

Entre los ensayos de resistencia y deformabilidad efectuados en las citadas presas, cabe destacar los de corte directo *in situ* con saturación de la roca (fig. 1), ensayo original, puesto a punto por el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, y dos ensayos a gran escala realizados en la cimentación de la presa de Mequinenza, que suponen, todavía hoy, un "record" mundial de ensayos de corte directo con presión normal controlada (4 x 4 m) (fig. 2).

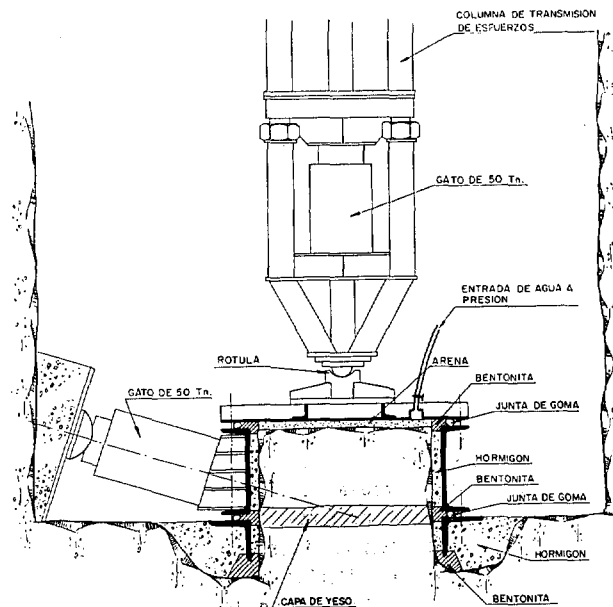


Fig. 1. — Dispositivo para determinar *in situ* la resistencia de una roca saturada de agua a presión.

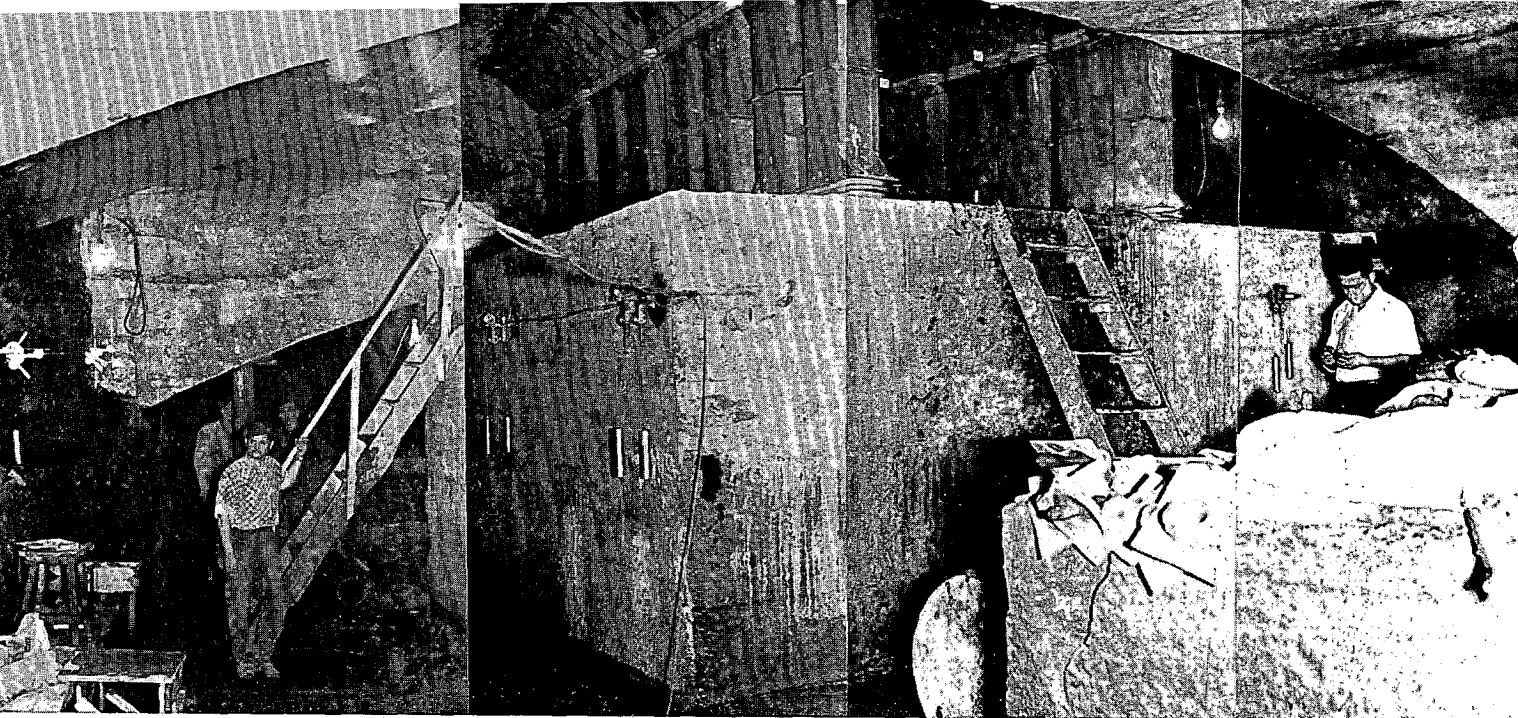


Fig. 2. — Ensayo de corte directo en roca de 4 x 4 m en la presa de Mequinenza.

La estabilidad de las presas de fábrica también ha sido objeto de informes, con métodos de cálculo, como el de los elementos finitos, que estudian el comportamiento conjunto de obra y terreno. Entre los casos tratados se encuentran los siguientes (fig. 3): El Grado II, Ribarroja y Beleña.

La Sección de Mecánica del Suelo ha estudiado también algunas veces la estabilidad de las laderas del embalse, problema que está relacionado con la explotación de presas. Por ejemplo, en Yesa, Iznájar, El Atazar y en Cedillo.

El conocimiento preciso de las características de resistencia y deformación de las laderas permite, en unos casos, asimilar su comportamiento para el proyecto de la presa a un gran macizo de características uniformes, y en otros, a dividir este macizo en dos o tres grandes capas cuyos módulos de deformación sean uniformes dentro de cada una, aunque diferentes entre sí. Sin olvidar que en problemas complicados hay que considerar el sistema complejo de estratos y diaclasas, con sus direcciones preferentes de deformación y hasta de posibles deslizamientos.

Conocidas las características del terreno y una vez fijada la forma de la presa como consecuencia del material previsible, puede acometerse el cálculo del plexo tensional de acuerdo con las teorías elásticas por medio de los ordenadores electrónicos. En la actualidad, el Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción, en colaboración con el Gabinete de Cálculo, están desarrollando programas para definir la geometría

de las presas bóveda y cuya salida sirva para alimentar otro programa mediante el cual se obtengan las tensiones en el macizo de las presas de fábrica.

La comprobación experimental de la resistencia de la presa por medio de modelos reducidos ha evolucionado en los últimos veinte años, en forma fácilmente perceptible. En los primeros modelos reducidos en "liltargel", realizados en el Laboratorio Central para las presas de Canelles, Eume, Santana y primera solución de Aldeadávila, se aplicaban extensómetros eléctricos en la superficie para la medida de deformaciones originadas por una carga hidrostática. Con esta técnica fueron también ensayados en el Laboratorio Central los modelos reducidos de las presas de Valdecañas, Matalavilla, La Almendra, La Barca, Soria, Las Duernas, Guijasalbas, Priedes, Riaño y Gran Suarno. Después se pasó a los ensayos de modelos construidos con materiales plásticos y aglomerantes, con los que es posible obtener materiales con un módulo de elasticidad del orden de los 70.000 Kg/cm<sup>2</sup> y coeficientes de Poisson igual a 0,3. En ellos se efectuaba la medida de las deformaciones con extensómetros eléctricos y se utilizaba mercurio como líquido de carga. Esta técnica fue aplicada en el Laboratorio Central en los modelos reducidos de las presas de La Baells y Los Angeles (fig. 4).

Aunque el políester tiene un buen comportamiento elástico, presenta, sin embargo, el inconveniente de poseer un coeficiente de Poisson ligeramente superior al del hormigón y de no ser adecuado para la reproducción de las características típicas de los ensayos de fisuración

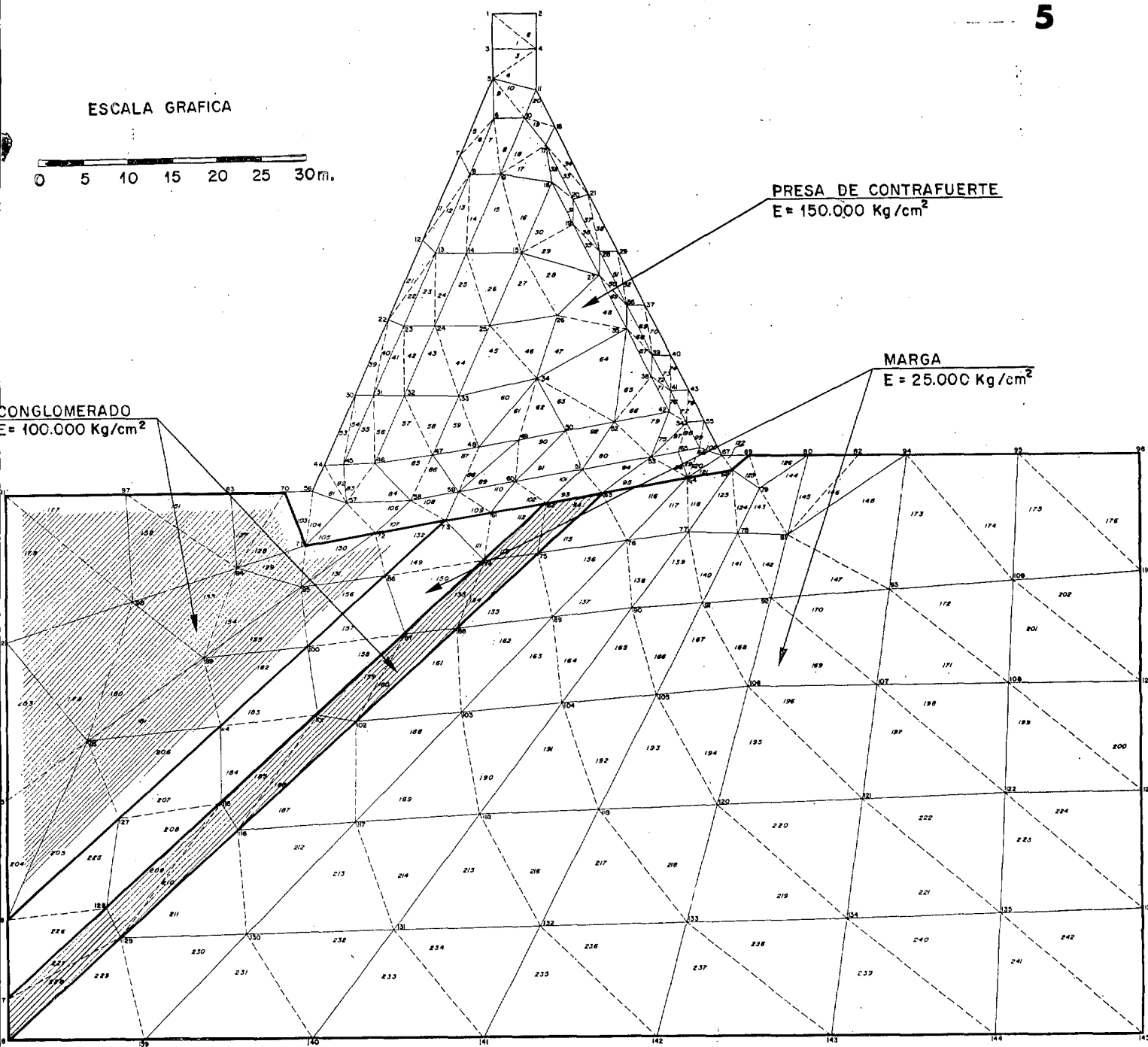


Fig. 3. — Red de elementos finitos.

o hasta rotura. Por esta razón se ha utilizado también la escayola para la realización de modelos de presas. Como ensayos elásticos de modelos reducidos de presas de escayola pueden citarse los de las presas de Los Angeles y de Lanuza (fig. 5), esta última ensayada en el presente año. La carga hidrostática se efectuó

con mercurio y las lecturas de deformaciones con rosetas extensométricas.

En los anteriores ensayos elásticos de presas se introducía la influencia del terreno de cimentación variando su módulo de elasticidad con relación al de la presa, pero no se reproducían en el modelo otras característi-

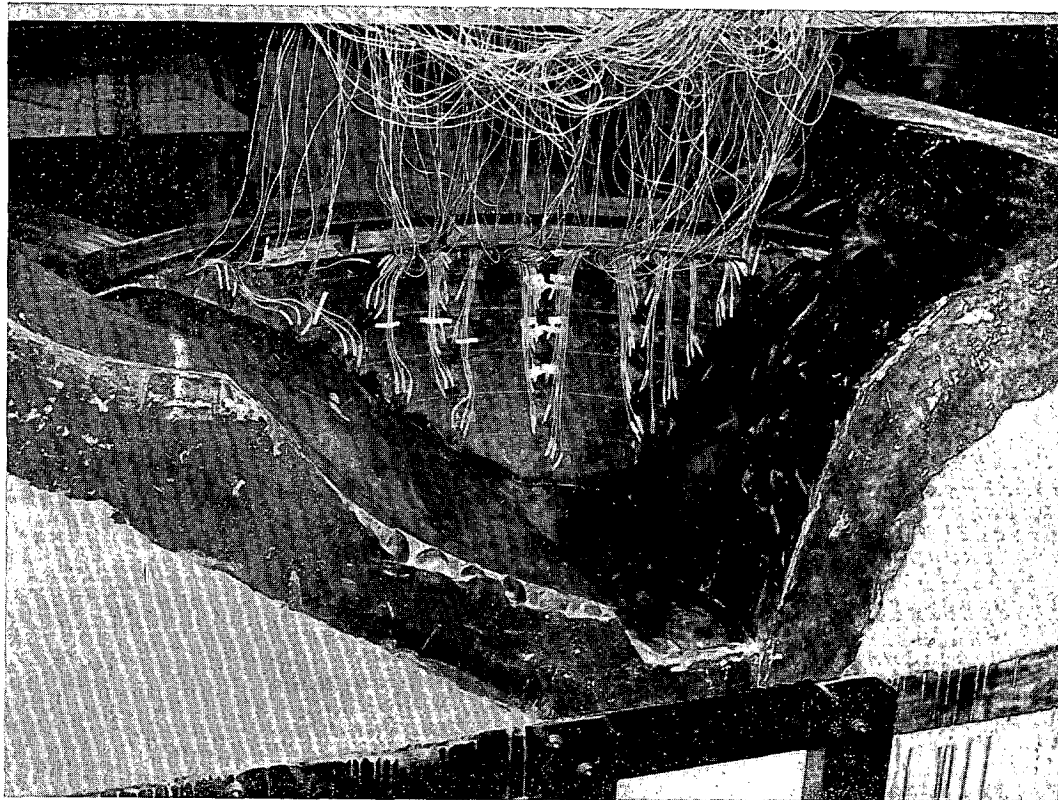


Fig. 4 — Ensayo elástico en modelo reducido de la presa de Los Angeles.

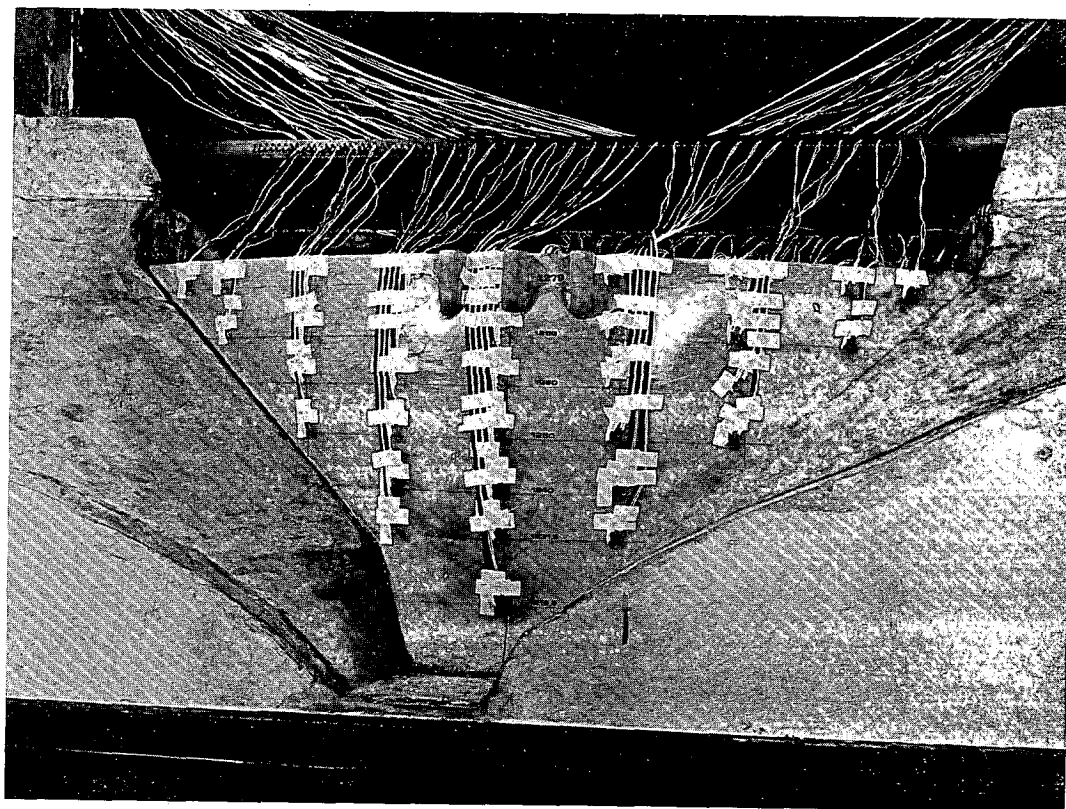


Fig. 5. — Ensayo elástico en modelo reducido de la presa de Lanuza.

y su participación en el desarrollo de las grandes presas españolas ha sido numerosa e importantísima.

Los ensayos en modelos reducidos de aliviaderos de superficie, desagües a presión, desagües de fondo, en resumen obras de evacuación o aprovechamiento de los volúmenes acumulados, son reproducidos a escala y se ensayan de acuerdo con las condiciones de semejanza fluido-dinámica. En algún caso el estudio de filtraciones y subpresiones se ha abordado mediante modelos de semejanza analógica.

Normalmente las fuerzas gravimétricas tienen influencia preponderante y la condición  $\hat{F} = 1$  apoya el establecimiento de escalas que resultan incompatibles con la condición  $\hat{R} = 1$ ; este problema es resuelto con suficiente aproximación con la adopción de una escala que asegure el pleno desarrollo de los fenómenos turbulentos en los caudales de ensayo.

Se saldría de la motivación de estas líneas la exposición detallada de cada uno de los problemas resueltos. Por esto, a continuación se exponen sólo algunos de los más interesantes.

En relación con los cuencos de resalto se ha desarrollado por el Laboratorio el que podríamos llamar cuenco corto. Ejemplo característico de esta solución es la que se muestra en la figura 7. Corresponde a la presa de Contreras y los ensayos permitieron comprobar la importancia del rulo amortiguador en la disipación global de energía; su supresión provocaba el arrastre. La figura 8 pertenece a los ensayos para la presa de Valdesia, situada en la República Dominicana, y es otro cuenco corto de resalto hoy ya en construcción.

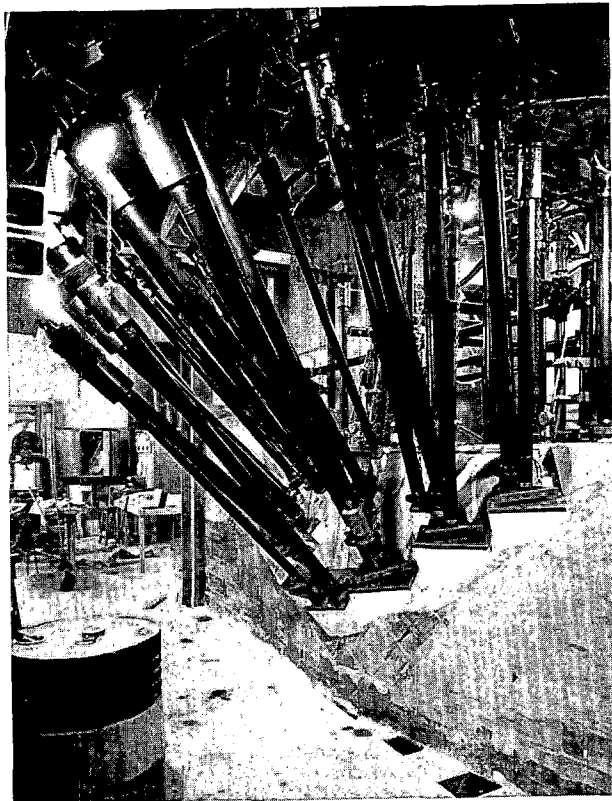


Fig. 6. — Gatos de carga para el ensayo en modelo reducido de la presa de El Atazar.

cas geomecánicas del terreno. En la presa de El Atazar, con objeto de comprobar la interacción presa-terreno y el comportamiento en rotura de la presa, se realizó un ensayo geomecánico en el que se reproducía el terreno, con sus módulos de elasticidad, diaclasas y rozamientos entre los distintos bloques, considerando en el ensayo no sólo la carga hidrostática, sino también el peso propio del terreno. Las cargas se aplicaron con gatos hidráulicos (fig. 6) con tres circuitos independientes, de tal manera que podían variarse los valores de estas cargas hasta obtener la rotura. Se midieron no sólo deformaciones y corrimientos en la presa, sino los posibles deslizamientos del terreno.

\* \* \*

En el segundo grupo citado al principio incluíamos el conjunto de problemas esencialmente hidráulicos. Su resolución por medio de los ensayos en modelos reducidos goza entre nosotros de un merecido prestigio y tradición, debidos en gran parte a la intensa labor desarrollada por el equipo que colaboró con el profesor Becerril. El Laboratorio de Hidráulica, que creó adjunto a su cátedra de la antigua escuela, ha incrementado su actividad dentro de nuestro Centro de Estudios Hidrográficos

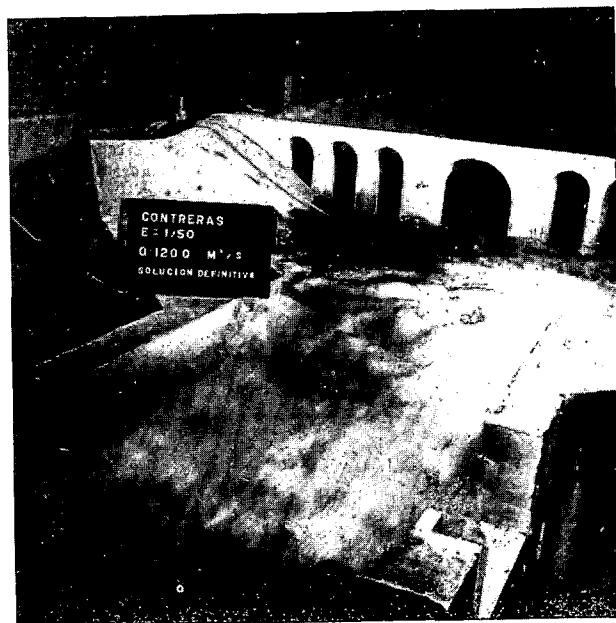


Fig. 7. — Presa de Contreras. Cuenco corto de resalto.

Además, se vienen proyectando otros en que, a fin de reducir la excavación al pie, el cumplimiento de la relación de resalto obliga a la construcción de una pequeña contrapresa. Uno de los últimos estudios de este tipo es el de la presa de Añarbe, para el abastecimiento de San Sebastián. Véase la figura 9 con una solución inaceptable.

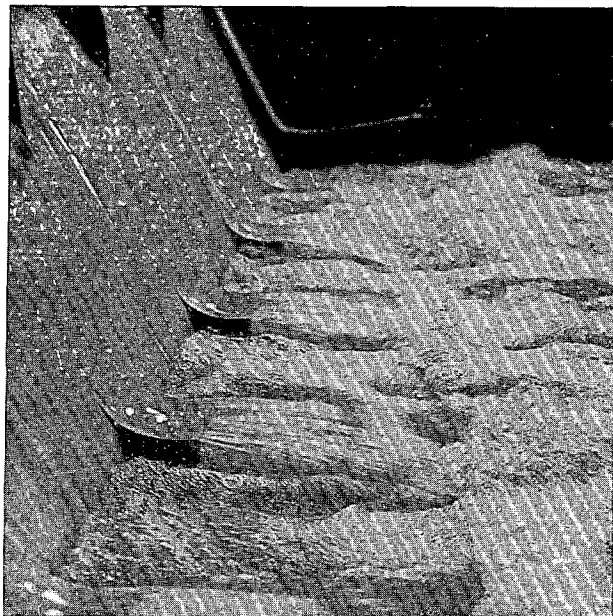


Fig. 8. — Presa de Valdesia. Cuenco de resalto.

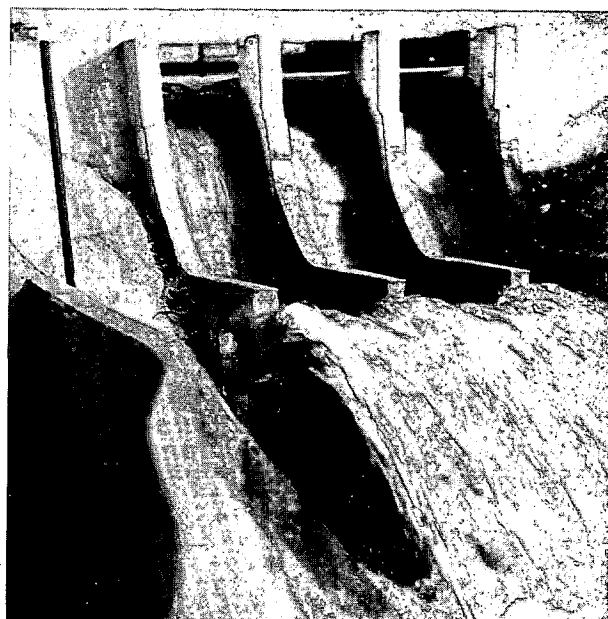


Fig. 10. — Presa de Valdeobispo.

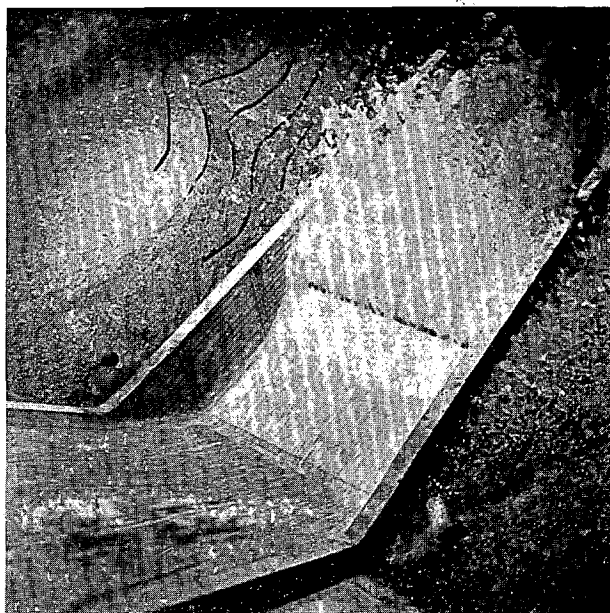


Fig. 9. — Presa de Añarbe. Solución inaceptable.

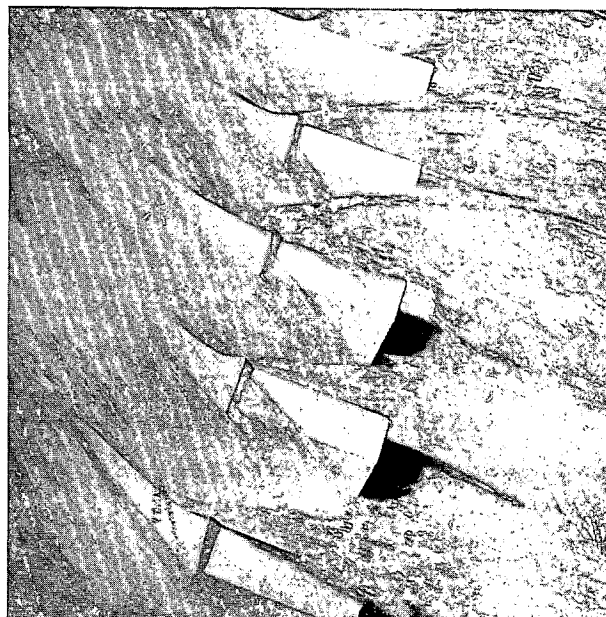


Fig. 11. — Presa de Bolarque. Influencia de los deflectores.

Si la rápida no es ancha, el desvío se provocaba por el peraltado de la solera, solución que venimos designando como trampolín helicoidal y que se utilizó por primera vez en la presa de Las Picadas; si la rápida es estrecha y además el espesor de lámina es grande, el experimentador actúa sobre los cajeros para voltear el lanzamiento. Esta solución se ha utilizado por primera vez en la presa de Venda Nova (Portugal).

En algún caso especial se mejora el mecanismo disipador disponiendo dientes en los trampolines. Ejemplos característicos de estas soluciones son las que se muestran en la figura 10, que corresponde al modelo de la presa de Valdeobispo, con vertido sobre la central y fuerte caudal unitario, y en la figura 11 del modelo de aliviadero de la presa de Bolarque, modificado para su acoplamiento a la estación de bombeo del acueducto Tajo-Segura; en él la finalidad de los deflectores es provocar el desvío del flujo en régimen rápido.

En las soluciones de presas bóveda con vertido sobre coronación se han estudiado en los últimos años diferentes soluciones con cuenco de protección al pie de la obra. Es característica de estas soluciones una fosa o arqueta de recogida de las aguas caídas en la zona de impacto, que, debidamente dimensionada, permite el reparto satisfactorio de estas aguas, e incrementando el espesor del colchón al pie de la presa, reduce las fluctuantes variaciones rápidas de presión y evita las depresiones.

La fotografía de la figura 12 corresponde a la presa de Lanuza, en la que se presenta un fuerte fenómeno de concentración de caudal que en principio es condicionante del problema.



Fig. 12.—Presa de Lanuza. Concentración de caudal.

En el estudio de grandes presas, el Laboratorio de Hidráulica ha colaborado también mediante ensayos de sus desagües a presión; indicaremos únicamente como ejemplo los de las presas de Añarbe y Cedillo.

El número de ensayos realizados en el Laboratorio de Hidráulica es tan numeroso, que resultaría sumamente larga la sola relación del nombre de las presas en que se ha intervenido. Contando solamente desde 1960, el Laboratorio ha colaborado activamente en el ensayo de diversos dispositivos de aliviadero en más de 50 grandes presas, entre las que se citan, por corresponder a proyectos realizados fuera de España, únicamente las de Bayano, en Panamá; Las Barías y Valdesia, en la República Dominicana, y Oued-Sly, en Argelia. Entre ellas figura un número muy elevado de presas vertedero, que son consecuencia lógica de la estrechez de nuestros cauces y la irregularidad de nuestros caudales. En otros casos resulta característica la solución paralela de aliviadero en pozo y vertedero superficial, que ha sido ensayada en sus múltiples variantes y cuya explicación puede ser análoga a la antes expuesta.

Por último, el Gabinete de Aplicaciones Nucleares, aplicando técnicas isotópicas, realiza estudios sobre movimiento de aguas subterráneas; para ello inyecta una solución de un radioisótopo, de actividad y vida media apropiadas, en el interior de un sondeo, aprovechando, en lo posible, los mismos sondeos de prospección geológica. El trazador radiactivo es arrastrado por las corrientes existentes y puede detectarse su presencia y tiempo de recorrido, en cualquier otro lugar. Se determinan así los estratos permeables y su porosidad, los flujos horizontales y verticales, las interconexiones subterráneas y con manantiales.

Por otra parte, se realizan medidas de concentración de los isótopos naturales de las aguas (tritio, carbono-14, deuterio y oxígeno-18) que permiten establecer las posibles correlaciones entre acuíferos y la edad de dichas aguas subterráneas.

Se emplean asimismo trazadores radiactivos que se recogen, o en su caso se inyectan, mediante sondeos entubados a profundidades variables, analizándose asimismo las aguas surgentes. A estas medidas se agregan las antes especificadas sobre los isótopos naturales de las aguas.

Todo ello permite conocer si las aguas analizadas proceden o no de un embalse y, persiguiendo el camino que señalan los radioisótopos, localizar los puntos de infiltración.

Para los aforos de aliviaderos de presa y de caudales turbinados se emplea el método de inyección única e instantánea de un radioisótopo, con integración de la ola de radiactividad que pasa por la estación de toma de muestra, mediante un sistema de instrumentación original.

En el Gabinete se está realizando una investigación sobre la capacidad de refrigeración de embalses, estudiando un modelo de simulación de temperaturas. En una etapa ulterior, el modelo será aplicado a los embal-

ses reales o en proyecto, con el fin de planificar el óptimo aprovechamiento, desde el punto de vista térmico, de los recursos hidráulicos del país. (La investigación comprende, asimismo, los ríos españoles, que requieren distinto modelo.) Esta evaluación es de gran importancia, habida cuenta del enorme incremento en un próximo futuro de las centrales no hidráulicas que, según el Plan Eléctrico Nacional, alcanzarán en 1983 una potencia eléctrica instalada de 15,3 millones de kW en térmicas convencionales y 15 millones de kW en centrales nucleares. Las cifras representan una evacuación total de calor por refrigeración del orden de 50 millones de kW térmicos que conviene absorber entre embalses, ríos y aguas costeras, puesto que las torres de refrigeración elevan considerablemente el precio de una central. El vertido de calor en las aguas está limitado por su posible utilización ulterior y por la resistencia a las temperaturas, y a su gradiente, de las especies piscícolas que habitan en ellas. En el mencionado modelo de embalse se acepta como hipótesis muy aproximada a la realidad la estratificación horizontal de las isoterms salvo en la zona próxima al vertido, y se calcula el calor que fluye por convección, por conducción y por intercambio con la atmósfera.

Para realizar esta actividad relacionada con presas y embalses cuenta el Gabinete con personal altamente especializado, tanto en las técnicas de campo como en las medidas en laboratorio que han exigido costosas instalaciones y, asimismo, en la investigación tecnológica y en la científica. Precisamente, una comunicación dirigida a la A.I.E.A. (Viena) sobre investigación radioisotópica en Hidrología, fue origen de un contrato internacional a través de la A.I.E.A. para adiestrar personal técnico en Bogotá (Colombia).

Con relación a los temas indicados, se han realizado trabajos en los embalses y presas de: Montanejos, El Grado; Contreras, Estremera, Susqueda, Ribarroja, Santiago y El Pardo.

\* \* \*

El tercer grupo lo forman aquellos temas en los que el problema hidráulico se entrecruza con el resistente de tal manera que es imposible considerarlos por separado. Muestra característica de este grupo son las presas de materiales sueltos, cuyo incremento en número y magnitud en España es muy marcada en los momentos actuales.

El Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo no sólo ha estado presente en el desarrollo de estos temas, sino que en muchos aspectos puede considerarse pionero en el ámbito nacional e incluso internacional.

En este tipo de presas no hay prácticamente ningún aspecto que no haya sido tocado con mayor o menor profundidad por el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo. En lo que respecta a los ensayos de laboratorio para la determinación de las propiedades geotécnicas de los suelos que constituyen el cuerpo de la presa, puede decirse que todas las obras españolas me-

dianamente importante han sido analizadas en sus instalaciones.

En ellas pueden llevarse a cabo toda clase de ensayos: de identificación y composición, de estado (humedad, densidad), de resistencia al esfuerzo cortante (triaxiales, corte directo, corte plano, etc.), de deformabilidad (triaxial, edómetro), de permeabilidad directa e indirecta, de expansividad, etc.

A continuación se citan algunas de las presas en las que se han efectuado estudios e informes de especial interés.

*Espanella*: Estudio de los materiales disponibles y proyecto de la sección tipo.

*Los Campitos*: Proyecto de la sección tipo, y modificaciones durante la construcción, para adaptarse al terreno de cimentación descubierto en las excavaciones.

*La laguna de las Yeguas*: Estudio de materiales y proyecto de la sección tipo. Esta presa, situada cerca del pico Veleta, a más de 2.000 m de altura, se está construyendo actualmente, con un núcleo de emulsión asfáltica, en frío. Novedad impuesta por la dificultad de acceso y por razones económicas, frente a la solución clásica de núcleo de aglomerado asfáltico.

*Rialp*: Estudio de viabilidad, en base a los materiales disponibles.

*Montanejos*: Anteproyecto completo de la obra.

*Guadarranque*: Estudio de los materiales, su colapsabilidad y medición de las deformaciones experimentadas durante la construcción y explotación.

*Contreras*: Proyecto de la sección tipo y estabilidad de la presa de cerramiento del collado de la margen derecha.

*Aiguamoix*: Estudio de la resistencia de la membrana asfáltica.

*Santillana*: Supervisión de los datos de control de la pantalla de aglomerado bituminoso.

*Ibón de Ip*: Estudio de materiales y recomendaciones sobre el proyecto.

*Embalse de La Bujeda*: Estudio de la expansividad y permeabilidad del material de recubrimiento del embalse.

Entre los estudios realizados sobre presas de materiales sueltos, cabe destacar dos nuevos métodos de cálculo que suponen, en algunos aspectos, un avance considerable sobre los convencionales, tales como el método del "perfil isorresistente" (fig. 13), que permite establecer, de una vez y sin los clásicos tanteos, el talud exterior de un terraplén con un determinado coeficiente de seguridad. El segundo procedimiento es el de los "campos asociados" que, conjugando las características de tensión y deformación, puede prever los movimientos de la presa, durante la construcción o en explotación. Asimismo, el método de los elementos finitos triangulares ha sido empleado para analizar la posible zona de tracción en el campo de la presa, y aplicar a ella las medidas oportunas para evitar los riesgos de fisuración.



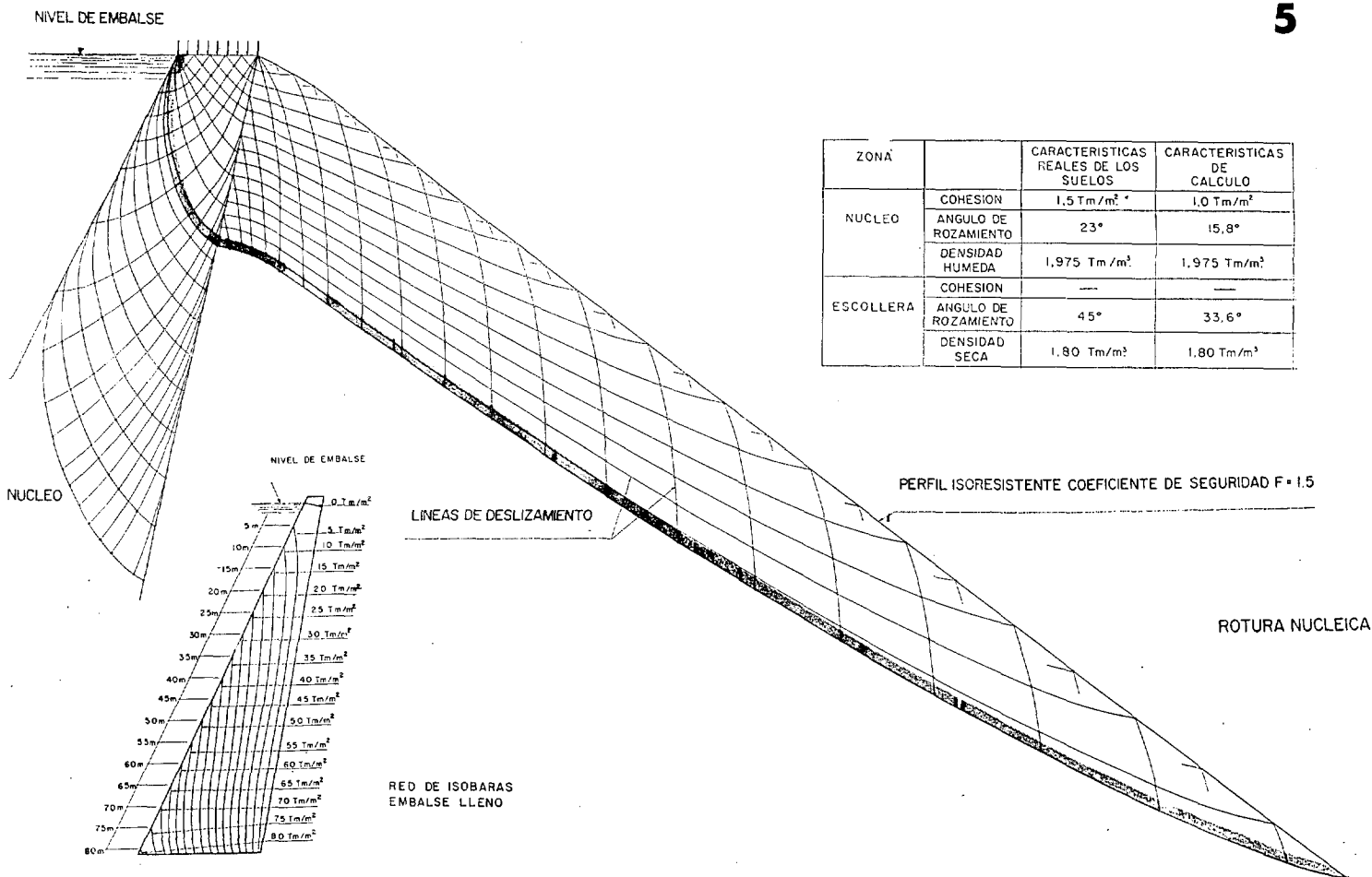


Fig. 13. — Presa de escollera. Perfil isoresistente del talud aguas abajo. A embalse lleno.

Conviene también destacar otras investigaciones de tipo experimental iniciadas en años anteriores y actualmente en curso. Entre ellas merece citarse el estudio de la colapsabilidad de suelos semisaturados y de escolleras, llamando así al fenómeno irreversible de la deformación o asiento de un suelo o escollera inicialmente no saturado cuando se inunda de agua, caso frecuente en el paramento agua arriba o en el núcleo de una presa de materiales sueltos, y que en muchas ocasiones provoca la fisuración de terraplén. También es digna de comentar la investigación sobre la medición de las ten-

siones del agua capilar y su variación, realizada con dispositivos de concepción y construcción netamente españolas.

\*\*\*

Estas cortas notas son buena prueba de la colaboración que los organismos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas vienen desarrollando en relación con las grandes presas, cuyo XI Congreso Internacional se va a desarrollar en nuestra capital.