

LA EVOLUCIÓN DE LAS FORMAS EN LAS PRESAS - BÓVEDAS

POR ENRIQUE BECERRIL, INGENIERO DE CAMINOS

Indica el autor, en este interesante trabajo, que el perfeccionamiento de los métodos de cálculo, los resultados y observaciones en las presas bóvedas construidas y, por fin, la experimentación sobre modelos, dan lugar a un cuadro de doctrina homogénea acerca del modo de resistir estas estructuras, que, aun cuando no alcance todavía la exactitud cuantitativa, basta para orientar la evolución que señala sobre varios ejemplares, y, concretamente, en tres importantes proyectos que él mismo redactó para otros tantos ríos de nuestra patria.

La consideración del proceso evolutivo de las presas bóvedas tiene considerable interés, pues muestra los tipos hacia los cuales camina en itinerario guiado por la lógica. Hoy, este proceso alcanza un punto en el cual la convergencia de las soluciones, la eliminación de prejuicios y la armonía plena entre las concepciones de la técnica y la adecuación intuitiva señalan, al menos provisionalmente, una culminación. Las realizaciones de los últimos años, que muchos ingenieros españoles no hemos conocido hasta después de terminada la guerra de liberación, son notables en este aspecto; pero el proceso venía incoándose y tocaba ya a su término, hasta el punto de que este artículo es una refundición, puesta al día, de otro, escrito para la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS en junio de 1936, cuyas ideas, durante los días interminables del Madrid rojo, tuvieron desarrollo en los proyectos de dos estructuras a que haremos referencia, señalando las coincidencias con soluciones que, en mundo más feliz en aquella hora, eran llevadas a realización.

El papel del cálculo.

Como siempre, en este proceso, el cálculo matemático ha actuado como secundo y poderoso auxiliar; pero las dificultades han sido —y son aún— muy graves. El perfeccionamiento de los métodos ha sido premioso, y en ocasiones los especialistas han sufrido la tentación de abandonar la empresa y buscar soluciones más atractivas, por más asequibles a la iniciativa personal, que parecían justificadas por los resultados contradictorios de la experimentación, en particular de la exploración de las cargas de trabajo, porque, en cuanto a la estabilidad, pocas estructuras pueden aducir, como éstas, un historial prácticamente limpio de accidentes.

Todo cálculo mecánico procede, más o menos, de una ficción, por cuanto introduce hipótesis simplificadoras que afectan a las condiciones intrínsecas del material y a la sustentación. Tales hipótesis constituyen, y muy particularmente en nuestro caso, un conjunto que define un estado arbitrario, del cual deri-

ván los resultados del cálculo que, aparte las imperfecciones propias de éste, no podrán tener otra validez que la que tenga la hipótesis originaria.

Por esta razón, tomando como criterio supremo el resultado, afirma con frase exactísima el ilustre ingeniero Dr. H. E. Gruner, que el cálculo es, sobre todo, "medio inteligente de comparar estructuras en proyecto con otras realizadas que hayan dado plena satisfacción", y, abundando en ideas análogas, nos decía recientemente otro distinguidísimo especialista, el ingeniero italiano Sr. Luigi Kambo, que "en estructuras tan complejas como las presas-bóvedas, lo que se puede pedir al cálculo es que oriente y precise la visión del ingeniero, sin pretender el conocimiento exacto de realidades cuantitativas; el orden de magnitud de los esfuerzos, y no más, será el objeto de la investigación analítica".

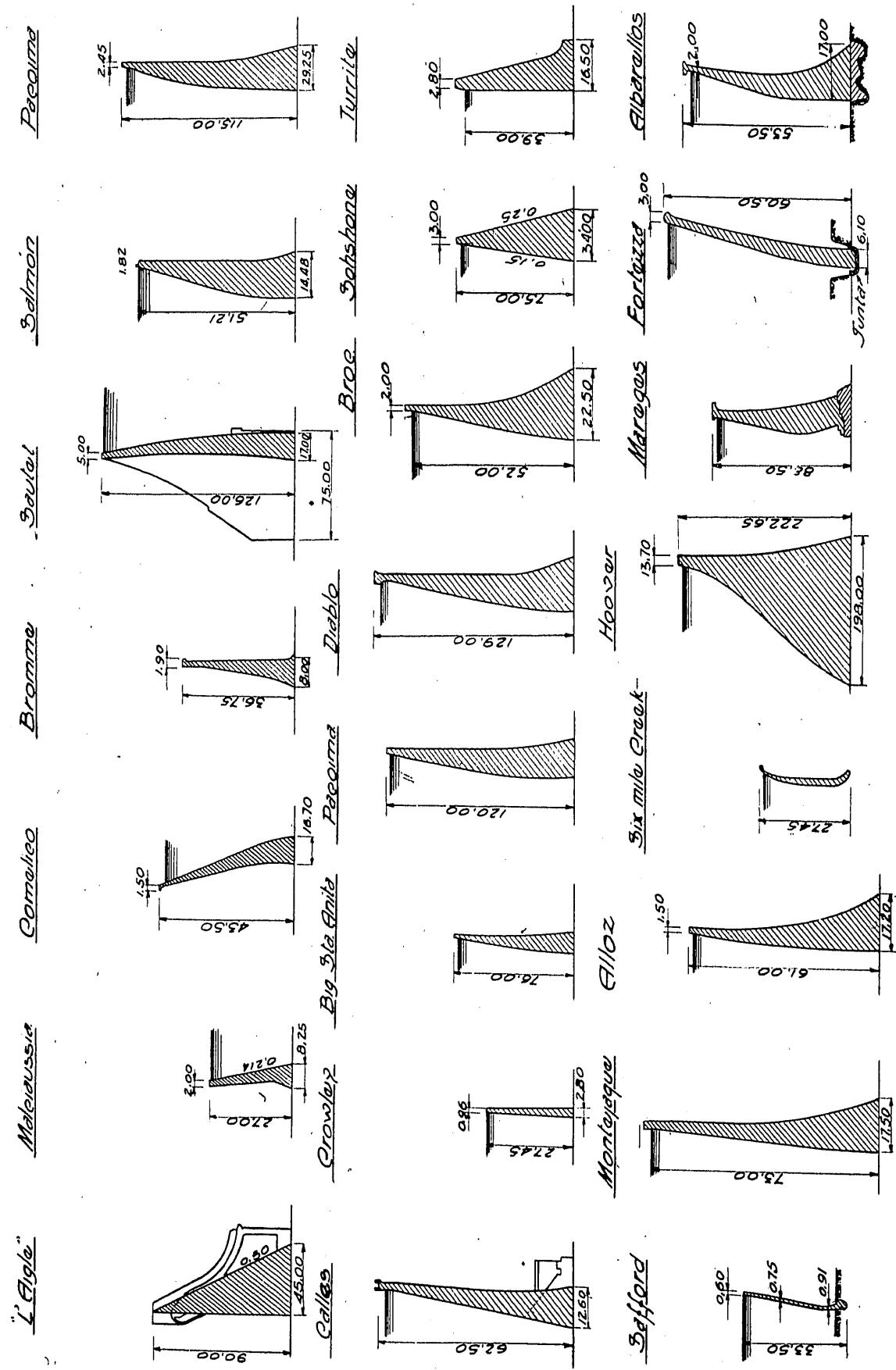
Evolución de formas y métodos.

La evolución de las presas en arco comprende dos escalas, que son simultáneas y se entrecruzan, procediendo de lo esquemático a lo complejo: La de las formas y la de los métodos de cálculo.

A su vez, la sucesión de tipos va quedando limitada, a derecha e izquierda, podría decirse, por dos criterios opuestos, el de las formas gruesas y el de las formas ligeras (1), que tienden a converger para dar lugar a tipos mixtos predominantes en los últimos años.

Modelos característicos de aquellos dos extremos son, de una parte, las presas de Shoshone y Pathfinder, y, de otra, la antigua presa de Bear-Valley. En tales construcciones ha predominado el empirismo; el análisis mecánico es elemental, y el resultado, imperfecto. Las presas de Shoshone y Pathfinder hubieran podido, desde luego, sustituirse por estructuras más ligeras y adecuadas, y en cuanto a la de Bear-Valley, se ha considerado preferible anegarla con la construcción de otra aguas abajo.

(1) Hasta cierto punto, esta clasificación se relaciona con la clásica: radio constante, ángulo constante.



Perfiles típicos de presas-hóvedas.

Puede objetarse, simplistamente, que, sin embargo, unas y otra han resistido. No basta esto. La resistencia, por sí sola, no es suficiente criterio ingenieril, sino que precisa el buen aprovechamiento del material, junto con la garantía suficiente.

El hormigón, quizás más que ningún otro material, se adapta a los esfuerzos a que está sometido, tendiendo a repartirlos según una distribución favorable a la resistencia. Así surge la concepción del arco interior (Résal), que lleva, como límite, a admitir la inhibición de las zonas tendidas. Las modernas ideas sobre plasticidad aclaran más este concepto, que conduce al sacrificio de la hipótesis de Navier. La misma teoría de la plasticidad sirve para explicar por qué no aparecen fisuras en puntos en que las cargas teóricas de tracción son superiores a las de rotura del material, y explica la reducción considerable de los efectos derivados de las variaciones térmicas, pues la lentitud con que éstas se producen da lugar a una adaptación del material, reduciendo su deformación y, con ello, los esfuerzos originados. Este fenómeno de la compensación parcial de las dilataciones o contracciones de origen interno (por variación de temperatura o retracción), mediante los efectos de plasticidad, tiene, indudablemente, gran importancia y merece estudio muy detenido.

Las hipótesis de cálculo han evolucionado, naturalmente, de lo sencillo a lo complejo, y podríamos clasificarlas en la siguiente forma:

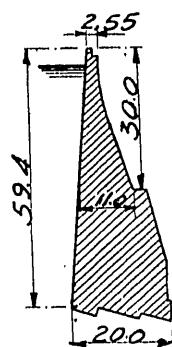
I) En razón de los elementos que se suponen resistentes:

- a) Los elementos resistentes son exclusivamente horizontales y no se influyen mutuamente (fórmulas de los tubos, métodos de Guidi Ippolito, etc.).
- b) Los elementos resistentes son horizontales y verticales, cumpliéndose una condición de continuidad. (Ritter, Stucky, Trial load system, etc.)

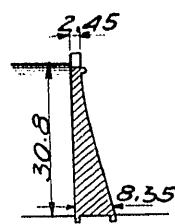
II) En razón del cálculo de los arcos:

- a) Método del anillo circular, delgado o grueso, sometido a cargas normales a su directriz.
- b) Por la consideración del arco, empotrado o apoyado, sometido a cargas normales a su tránsito (uniformes o variadas).
- c) Por la consideración de la misma hipótesis, imaginando, además, una deformación de los apoyos. (Vogt.)

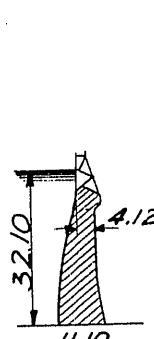
Gibraltar California



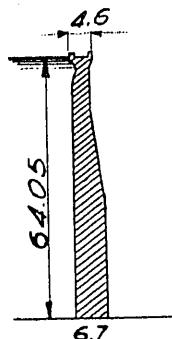
Thin



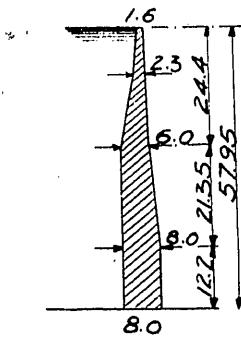
Karkhoff



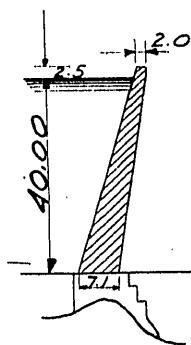
Mormonflat



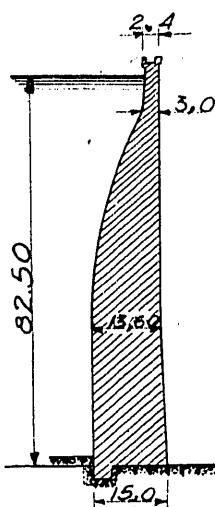
Eels Canyon Creek



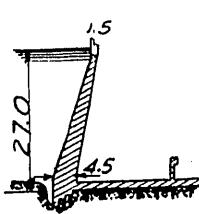
Chiusella



Cushman Dam Wash



Railroad Canyon



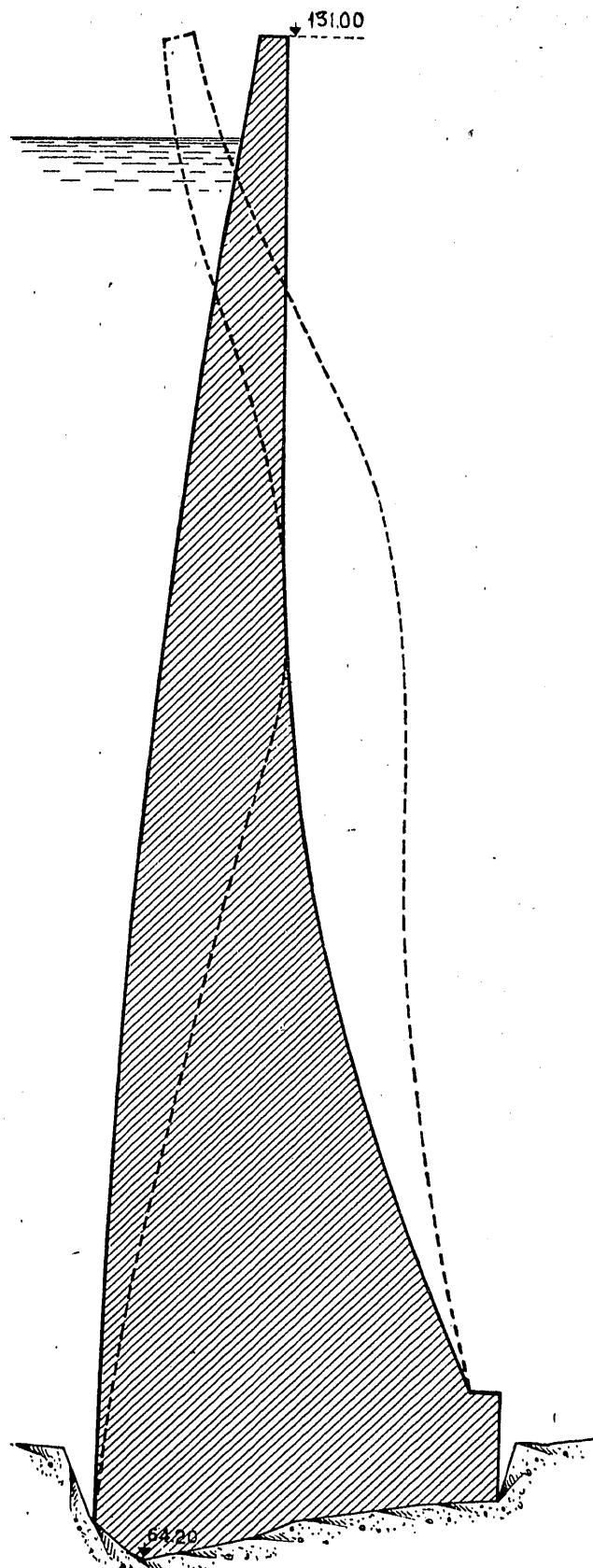
A parte queda el procedimiento de cálculo más perfecto teóricamente; la consideración total de la estructura como una superficie, a la manera del cálculo de las bóvedas delgadas, por más que su aplicación tropiece con considerables dificultades de planteamiento y desarrollo, que han impedido, hasta la fecha, por lo menos su generalización.

La consideración de la sucesión anotada es sumamente instructiva. En ella se encuentran, cuando se analiza en detalle, curiosos movimientos contradictorios. Por ejemplo, de la introducción, en el cálculo, de la rigidez de los elementos verticales, que representa un paso hacia el conocimiento del régimen elástico de la presa, se deduce alivio considerable de las tensiones en los arcos de la zona inferior, es decir, los más expuestos a tracciones peligrosas, y mejor repartición de las cargas, gracias al trabajo suplementario de los arcos superiores. Pero, inmediatamente, se descubre que con tales premisas las cargas máximas de trabajo por tracción se trasladan de sitio, y aparecen en el trasdós del muro. Entonces Kamüller propone establecer, para presas de poca altura, una junta horizontal que interese la zona de tracciones peligrosas, y nuestro ilustre Ministro de Obras Públicas, señor Peña, va más lejos, y preconiza la construcción por anillos independientes, para asegurarse de que no existe más trabajo que el de los arcos, lo que suprime la indeterminación elástica a cambio de anular la acción ménsula, y para mejorar la resistencia de los arcos propone una sustentación especial, a cuya eficacia queda encomendado el asegurar, en éstos, un trabajo uniforme o casi uniforme de compresión.

Validez de los métodos de cálculo usuales.

Puede decirse, en resumen, que los procedimientos usuales de tanteo de cargas permiten un suficiente conocimiento de la distribución de esfuerzos y, en consecuencia, la intuición del régimen de trabajo, lo que consideramos fundamental, porque de ella derivarán, como consecuencias necesarias, la adecuación de las formas y aun el perfeccionamiento de los métodos de cálculo. No puede olvidarse que el *Reclamation Service*, de Norteamérica, utiliza estos métodos, y ha acopiado ya, por sí solo, con brillante resultado, una experiencia comparable a la de los restantes países del mundo.

Además, y es tema en el que valdría la pena de insistir, la experimentación en obra y sobre modelos confirma, en líneas generales, el acuerdo con estos cálculos, si bien las influencias termométricas, y otras, pueden dificultar la interpretación correcta de los resultados. Sin perjuicio, quizás, de molestar en otra ocasión la atención de los lectores, damos hoy la elástica de la ménsula central de la presa de Alloz. Su simple examen basta para afirmar la solidaridad arco-muro, que es base de tales sistemas. Nótese que la deformación hacia aguas arriba es debida, probablemente, a un efecto de dilatación térmica, sin que pueda ponerse en duda la intervención de los arcos superiores que, por este mecanismo, acuden en auxilio de



Deformación registrada en la presa de Alloz.
Ménsula central.
(Relación de escalas, 2 000.)

los más cargados. Naturalmente, la intervención de los arcos superiores es tanto mayor cuanto lo sea su rigidez.

Señalemos, en homenaje a la verdad, que hay un punto dudoso, no del método mismo, sino relacionado con la hipótesis de sustentación de la ménsula en la base. Es frecuente suponer empotramiento perfecto. El ingeniero italiano Eugenio Campini señala preferencias por el supuesto del simple apoyo, y, entre una y otra postura, caben las intermedias. Los resultados de la práctica son contradictorios; pero, en definitiva, quizás pudieran armonizarse si se tiene en cuenta, en ciertos casos, la existencia de fisuras horizontales en el trasdós, es decir, en zonas a las cuales, a veces, no se ha aplicado el cálculo por suponer que constituyan verdadera prolongación del terreno. A la consideración del ingeniero quedará optar por una u otra hipótesis, así como el modo de dar realidad a la elegida.

Las acciones térmicas.

Su importancia se entiende, en general, que es considerable, con orden de magnitud comparable a las hidrostáticas, e influencia aún mayor en el régimen de tracciones, respecto al cual se superponen a los desplazamientos de los apoyos, debidos, bien a la acción transmitida por los arcos, bien a la presión hidráulica directa, sensible especialmente en las presas de gran altura.

Las acciones térmicas pueden separarse en tres grupos:

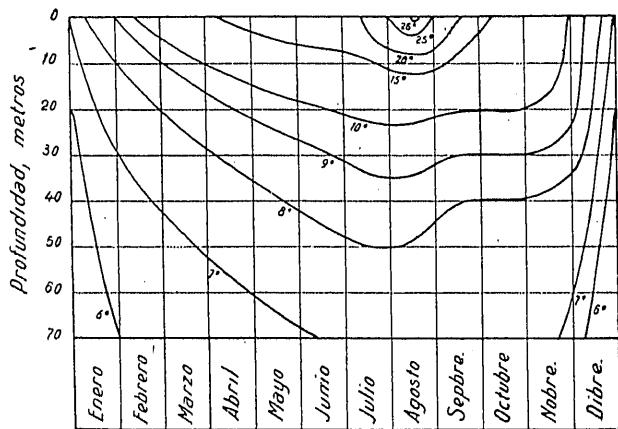
- Acciones según la directriz, por descenso uniforme de temperatura, que producen compresión o tensión y, además, momentos flectores originados por el empotramiento.
- Acciones de flexión pura, sin acortamiento, por desigual temperatura, supuesta distribución lineal entre ambos paramentos.
- Acciones que pudieran llamarse *laminares*, por discrepancia entre la repartición efectiva y la lineal b), incompatibles con la hipótesis de conservación de las secciones planas y, naturalmente, más sensibles en las presas gruesas.

La transmisión térmica se realiza, en su mayor parte, por conducción; el fenómeno parece hoy bastante bien conocido, y la longitud de onda de su propagación resulta del orden de 15 m., para hormigón seco, y mayor para hormigón húmedo; la amplitud anual se reduce a la mitad a profundidad de 1,7 m., y

a $\frac{1}{10}$ a 5,5 m. (Vogt.)

Por otra parte, la acción del agua, durante la mayor parte del año, actúa como freno de la oscilación térmica, y esa influencia, quizás, se acentúa por infiltraciones lentas e incluso evaporación.

Vogt, como resultado de los ensayos de Arrowrock, principalmente, da unos gráficos ya clásicos; por nuestra parte añadimos unas curvas de temperatura del agua en el embalse de Burguillo (Saltos del Alberche), que forman parte de un ciclo de experiencias que estamos realizando; ya se ve cuán pequeña ha de resultar, en definitiva, la amplitud de la variación anual en casi toda la altura del embalse.



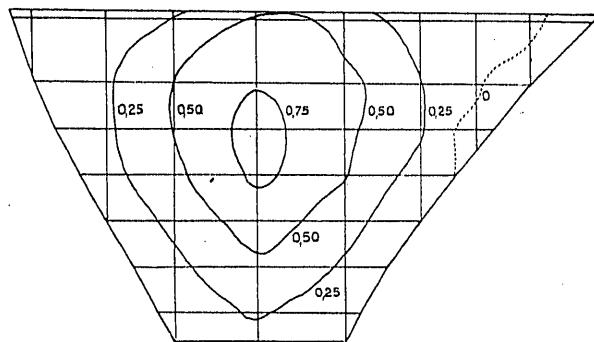
Variación anual de la temperatura en el embalse de Burguillo (Saltos del Alberche).

Aparte, quedan los fenómenos de enfriamiento y retracción subsiguientes al fraguado, que indudablemente representan cargas considerables, difíciles de evitar, sobre todo en presas gruesas, en que la retracción y la eliminación de calor subsisten por más tiempo del que, ordinariamente, es posible esperar para el cierre de las juntas y comienzo de la explotación. El empleo de cementos fríos, las disposiciones especiales para evacuación de calor, las inyecciones de cemento, en las juntas y en las laderas, e incluso la creación de coacciones iniciales (presa Calles, Méjico), son los medios de que el ingeniero dispone para moderar el peligro de fisuración por tales causas.

Pero la impresión de alarma que el análisis de los fenómenos térmicos en las presas en arco —y que afectaría análogamente a las de gravedad— pudiera dejar, contrasta con la realidad de la resistencia excelente de las estructuras en servicio hace muchos años, e inclina, en último término, a adherirse a la opinión expuesta claramente por el Ingeniero italiano Oberti: "Procede hacer resaltar que la *carga hidráulica* en las presas en arco, de altura considerable, construidas con todas las actuales prescripciones de la técnica (juntas, etc.), debe estimarse con mucho la acción más importante en cuanto se refiere al conjunto de los esfuerzos. Las otras causas producen deformaciones que pueden ser del mismo orden que las debidas a la carga hidráulica, pero que, a diferencia de éstas, no van acompañadas de esfuerzos; sólo si los vínculos de la estructura coartan de algún modo esta deformación, pueden generarse esfuerzos: la plasticidad del

material, la presencia de juntas, los asientos locales, incluso leves fisuras en los paramentos, son otros tantos alivios que permiten producirse a la deformación y reducen los esfuerzos..."

Tampoco está de más recordar, en cuanto afecta a la influencia de las tensiones en la resistencia general, y por tanto, a los temores que inspire la fisuración local, que el trabajo de deformación de la estructura se mide por una integral de volumen en la que figuran por su cuadrado las reacciones moleculares, predominando, por consiguiente; con mucho, las grandes



Deformación de la presa de la Rochetta, según ensayo.
Cotas en milímetros.

cargas a compresión que, además, afectan a volumen mucho mayor que las tracciones.

Y todo esto justifica que, en ensayos llevados hasta la destrucción del modelo de presa, se haya comprobado que ésta se produce cerca ya del límite de resistencia a compresión uniforme del material, lo que supone un altísimo coeficiente de seguridad, y concuerda con los resultados excelentes de la práctica.

En definitiva, es preciso meditar sobre la cuantía de las acciones térmicas, y parece que debe aspirarse a su fijación realista y, simultáneamente, a la limitación de las cargas de trabajo, particularmente, por tracción.

Los ensayos sobre modelos.

Naturalmente, planteados en la forma en que lo están los problemas del cálculo de presas, era lógico recurrir al ensayo sobre modelos, acerca de lo cual hay ya una abundante literatura técnica.

Ultimamente se han realizado en Italia varios, en el Politécnico de Milán, bajo la dirección del Profesor Danusso, a quien queremos dar, desde aquí, las gracias por su amable acogida en reciente e instructiva visita; uno de estos ensayos, el correspondiente a la presa de la Rochetta, ha sido publicado en la *Energia Elettrica*, enero 1940.

Reproducimos las líneas de nivel de las flechas

horizontales en el paramento aguas abajo, y extractamos las importantísimas conclusiones:

- A) En estructuras con gran coeficiente de seguridad, la acción de ménsula, parcialmente empotrada, contribuye notablemente a la resistencia.
- B) El cálculo, considerando arcos empotrados independientes, asociado a la imposición de altos coeficientes de seguridad, no corresponde al comportamiento estático normal.
- C) Si el coeficiente de seguridad no fuese muy elevado (v. g., para más de 100 m. de altura), la estructura tiende a resistir por arcos independientes.
- D) La asimilación de la parte inferior de la presa a elementos anulares, uniformemente cargados, no corresponde a la realidad.

Señalemos, en fin, la eficacia de la experimentación, tanto para orientar, desde un punto de vista general, la evolución de las estructuras, como para resolver los problemas concretos de un cierto proyecto.

Las formas cupulares.

Ya queda dicho cómo la teoría arco-muro expresa, en forma ciertamente arbitraria, pero muy clara, la acción de los arcos superiores y del empotramiento inferior, sobre el perfil del muro. Este resulta, por tanto, sometido a una reacción y un momento localizados en su base, y a otras reacciones, y también, momentos en la zona superior, por el efecto de la rigidez de los arcos superiores, y aspira así a tener en cuenta, en su conjunto, la forma de la estructura.

El elemento vertical, sobre el que actúa además su peso propio, se analiza, pues, como un elemento de cúpula, cuya forma teórica podría determinarse por tanteos sucesivos, trazando las curvas antifuniculares de los empujes. El resultado incita a concebir la presa como una especie de velaria invertida, en que pudiera realizarse un trabajo exclusivo o predominante de compresión.

La tendencia se señalaba de modo más o menos claro en algunas presas construidas antes de 1936, en particular las de Massciaua y Comélico (1) (Italia) y Marèges (Francia), y la recogimos y desarrollamos para nuestro proyecto de presa en Albarellos (provincia de Orense), aun cuando el recelo que puedan inspirar a la Administración innovaciones excesivas nos hizo aplicar muy cautamente estas ideas y evitar los desplomes en la parte baja del trasdós, por no considerarlos enteramente imprescindibles en ese caso, aun cuando fueran aconsejables.

Llevan consigo estas formas la aparición de des-

(1) Ver *Ingeniería y Construcción*, febrero 1935.

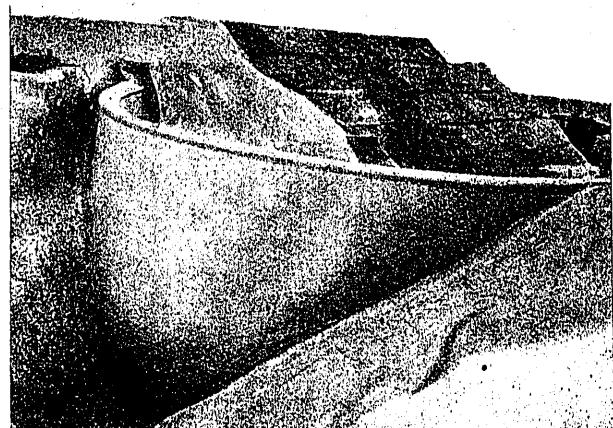
plomes en la parte superior del perfil, por el lado de aguas abajo, en la zona central, y en la parte inferior del trasdós, por el lado de aguas arriba. La aceptación de estos desplomes dependerá, claro es, de su importancia y de los medios de construcción. En general, con valores de hasta 10 ó 15 por 100, no representan obstáculo constructivo de ninguna clase.

Su influencia no será sólo la que ya se ha indicado por el efecto sobre el régimen del muro, sino que permite una reducción importante de los radios de los arcos, especialmente en la zona más cargada (hacia los dos tercios de la altura), con la consiguiente mejora de las condiciones de trabajo, respecto a una presa idéntica, sin desplomes.

Para eliminar enteramente las tracciones en la porción inferior, los desplomes teóricos serían enormes, dada la importancia de las cargas horizontales. En general, el régimen de compresión pura será alcanzable, pero siempre podrán limitarse las tracciones del trasdós a valores moderados.

En algún caso, por ejemplo en la presa de Fortezza (Bresanone, Italia), se ha eliminado el problema mediante una junta horizontal que, claro es, suprime las tracciones y convierte en simple apoyo la sustentación de la ménsula, trazada igualmente en desplome. El espesor de base es, tan sólo, de 6,10 m. (altura, 60; luz en coronación, 40 m.; en fondo, 26 m.).

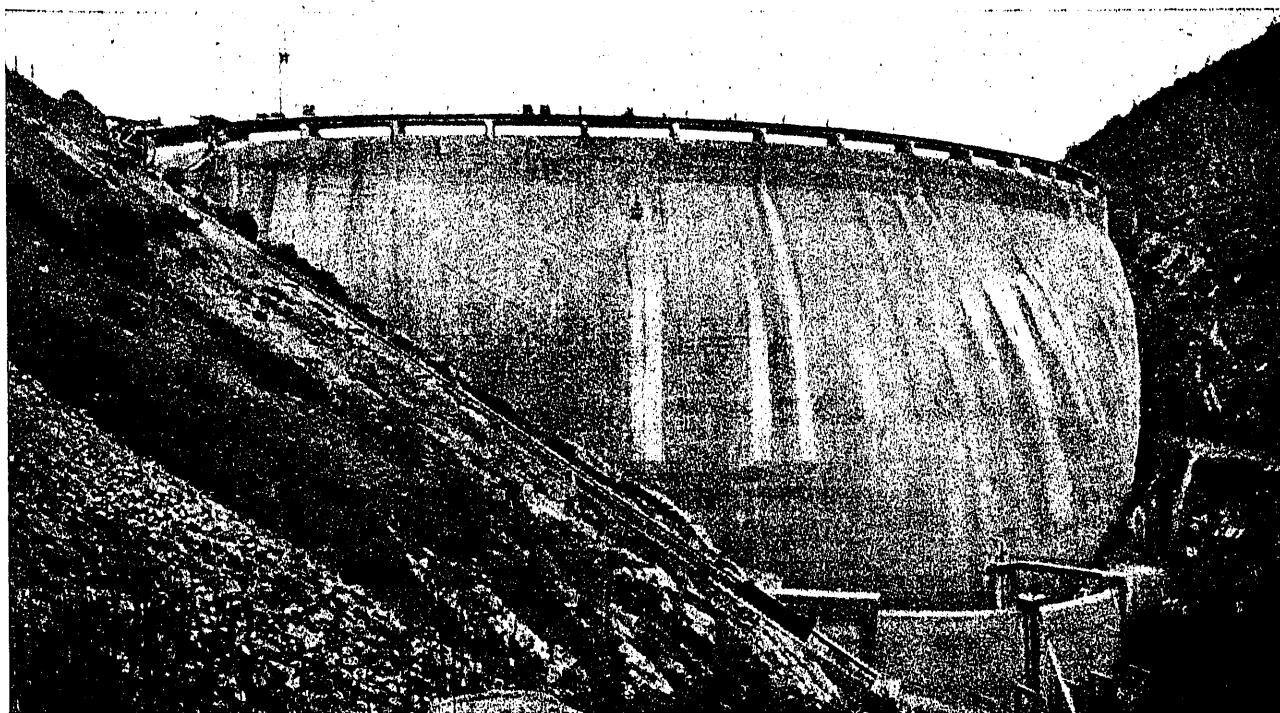
En Marèges se ha dado mucha importancia a la deformación de la presa a embalse vacío, y por esto se han dispuesto apoyos sobre los cuales descansen, por la parte de aguas arriba, cuando falte el empuje del agua. ¿Son realmente necesarios tales apoyos? Es evidente que alivian o suprimen las tracciones que



Modelo en estudio de una presa cúpula (1940).

pudieran aparecer en el intradós, pero la importancia de estos esfuerzos es pequeñísima, y si la presa tiene, también, desplome en su parte superior, hacia aguas abajo, lo más probable es que no existan; hay que tener en cuenta, además, el efecto de la rigidez de forma, sin que sea aceptable, sino como abstracción, y con las condiciones que señala la mecánica elástica, la separación de un elemento vertical de pequeña anchura, del mismo modo que nadie estudiaría la estabilidad de una cúpula por la de un elemento fusiforme de ella.

La concepción de las presas como superficies culiformes, último paso de esta evolución, tiene plena realidad de una presa italiana de 70 m. de altura y



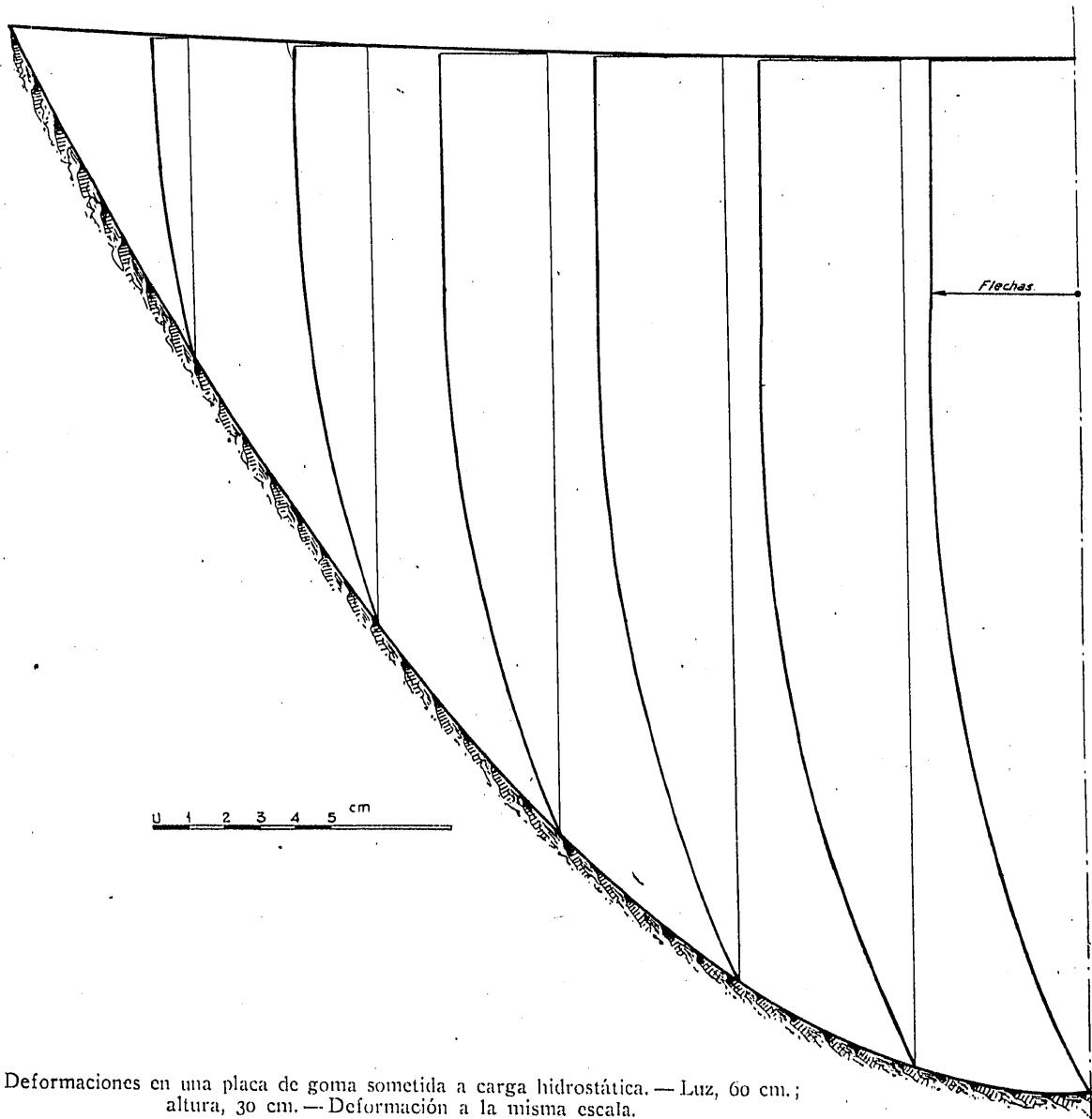
Una presa cúpula italiana de construcción reciente.

200 de desarrollo, proyectada por el Ingeniero Nicolai, y ya en servicio.

Por nuestra parte, recogiendo las ideas expuestas y la experiencia de proyectos anteriores, entre ellos los de Alloz y Albarellos, de que hemos hablado, hemos llegado a conclusiones semejantes para otra presa en proyecto.

lógico de ideas que previamente estaban en la técnica universal.

La aplicación del cálculo, aun con las salvedades que respecto a la exactitud de los métodos usuales hemos dejado anotadas, hace ver cuánto mejora el régimen de trabajo de la estructura cupular respecto a las simples presas-bóvedas. Así, en el proyecto de



Deformaciones en una placa de goma sometida a carga hidrostática. — Luz, 60 cm.; altura, 30 cm. — Deformación a la misma escala.

Previamente habíamos realizado, con el Ingeniero de Caminos D. José Temes, unos ensayos sobre modelo de goma, para determinar la elástica de una placa empotrada en un contorno parabólico y sometida a carga hidrostática, cuyo resultado se resume en la figura. Esta es, pues, una superficie antisíunicular, que utilizamos para pasar al perfil tipo c), que se acompaña. La rara coincidencia con las características de la presa italiana citada, ha de atribuirse al desarrollo

Albarellos fué posible cumplir satisfactoriamente prescripciones prudentísimas, establecidas por la superioridad, respecto a un proyecto anterior y que, en caso contrario, hubieran obligado a su abandono o a la sustitución por un perfil de gravedad inadecuado y antieconómico. Esta evaluación *comparativa* nos parece muy concluyente.

A nuestra ordenación hidráulica, tan necesitada de resoluciones que hermanen la economía con la segu-

ridad, interesa, sin duda, la tendencia que dejamos apuntada; seguramente, los nuevos tipos han de extenderse, y su uso ampliará el campo de aplicación de las presas-bóvedas, que representan la solución más ingenieril y atractiva del problema del embalse.

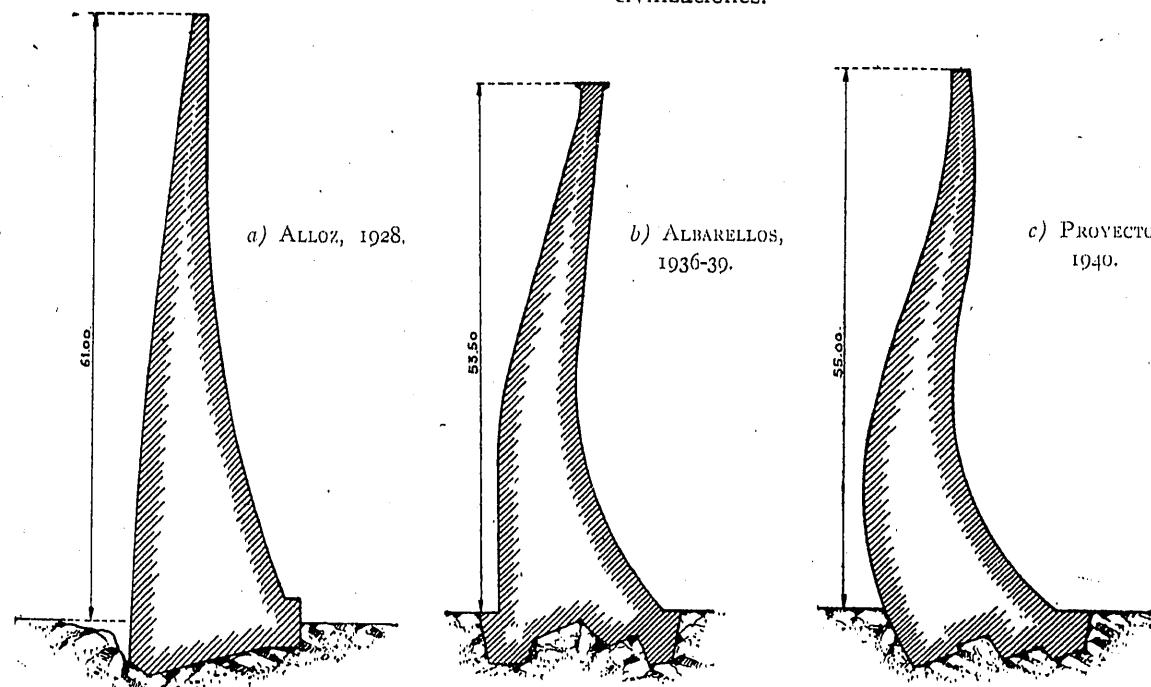
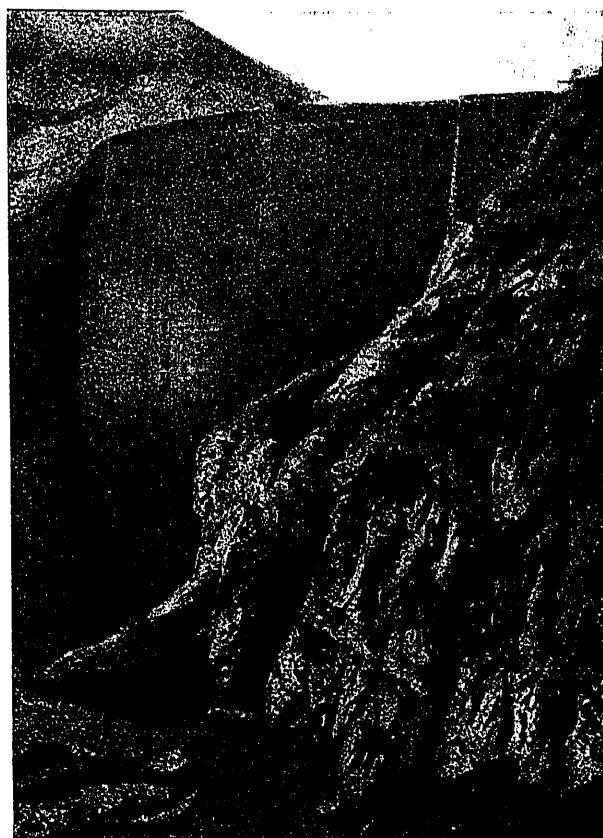


Fig. 7.3.—Tres tipos característicos de la evolución de las presas-bóvedas en proyectos españoles.



Por otra parte, es notable el hecho de que la humanidad descubra una vez más, ahora con nuevas modalidades, estructuras cupulares de que la naturaleza es tan pródiga y que, en la obra del hombre (vasijas, ánforas, copas), tienen la antigüedad de las más viejas civilizaciones.

Referencias bibliográficas.

- "Report on Arch Dam Investigation", *P. of. ASCE*, mayo 28, pág. 127
- GULDI: "Statica delle dighe".
- NOETZLI: "La diga di Stevenson". *Energia Elettrica*, noviembre, 1926.
- DANUSSO: Idem id., diciembre, 1926.
- KAMBO: "Studio della diga di prova Stevenson". *E. E.*, noviembre-diciembre, 1928.
- NOETZLI: "Gravity and arch action in curved dams". *Trans. ASCE*, 1921.
- STUCKY: "Etude sur les barrages arqués". *Bull. Tech. de la S. R.*, 1922.
- CAMPINI: "La ripartizione del carico idrostatico tra travi ed archi nelle dighe ritenuta a volta unica".
- RITTER: Die. "Berechnung von bogenformigen Staumauern".
- HOWELL & JAQUITH: "Analysis of arched dams by trial load method". *Trans. ASCE*, 1929.
- "Committee on Arch. Dam. Investigation". *Proc. ASCE*, 1927.
- G. OBERTI: "Risultati di studi sperimentali eseguiti sopra un modello di diga ad arco recentemente costruita". *E. E.*, enero 1940.
- F. VOGT (Comité Nacional Noruego): "Fundamental views in the analysis of arch dams 2.º W. P. C.". Berlín, 1930, vol. IX.
- A. GENTHAL (Comission Int. de Grands barrages): Rapport spécial ... ibid.
- GÓMEZ NAVARRO: *Saltos de agua y presas de embalse*.
- J. J. ARACIL: *Sistemas de cálculo de presas-bóvedas, Hormigón y acero*. Enero, 1936.
- MAJORAL: "Consideraciones sobre los proyectos y construcción de presas-bóvedas". *W. P. C. Sección Especial*. Barcelona, 1929.

Presas de Alloz.—Vista desde aguas arriba.