

PRESAS DE CONTRAFUERTE

Por MANUEL ZABALA MENDÍA, Ingeniero de Caminos y
JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ CASADO, Ing. de Caminos e Ing. Aeronáutico.

Los autores estudian en éste y sucesivos artículos una ordenación para dimensionado y cálculo de presas de contrafuertes, aportando muy interesantes datos de obras construídas y preparando un completo estudio del problema.

En la presa de gravedad maciza se asignan a la masa dos funciones simultáneas: impermeabilidad y resistencia mecánica. Los defectos producidos en la primera por la acción de aguas puras en alta montaña llegan a afectar a toda la masa, peligrando la estabilidad; la disposición maciza de la presa impide conocer la cuantía de este peligro, y cuando se decide una reparación, obliga a inyecciones en todo el volumen.

La presa de contrafuertes separa la función impermeabilizadora de la de sustentación y permite adoptar criterios constructivos diferentes para ambas, con elección de las debidas dosificaciones y dispositivos, y seguir, durante el servicio, la vida del hormigón, atajando sus posibles alteraciones con la máxima amplitud de movimientos.

Además, el perfil de gravedad macizo en presas de altura reducida, hasta 60 m., por ejemplo, dista mucho de saturar las posibilidades del material a compresión. Este criterio racional de proyecto nos trae, por añadidura, la mejor utilización del material, con la consiguiente economía.

Con relación a lo anteriormente expuesto, son de suma importancia las siguientes conclusiones formuladas por la Comisión Noruega del Hormigón (1): "En las presas de gravedad macizas, a causa del calor producido por el fraguado y endurecimiento, existe una marcada diferencia de temperatura entre el interior de la masa y los paramentos. Solamente después de largo tiempo adquiere el conjunto la temperatura media anual. El enfriamiento del hormigón en los paramentos es más rápido que el del interior, por lo que se producen inevitables grietas y fisuras. Las juntas que se disponen normalmente en las presas de gravedad actúan en las dilataciones transversales de la fábrica, siendo su influencia, en lo que se refiere a la diferencia de temperatura entre paramentos e interior de la masa, muy reducida.

"En las presas bóveda, bóvedas múltiples y de contrafuertes, la relativa delgadez de elementos permite al hormigón alcanzar rápidamente, durante la construcción, la temperatura del exterior. Una distribución de juntas longitudinales evitará las consecuencias de posteriores cambios de temperatura.

"Es necesario el aislamiento del paramento de aguas abajo por medio de una pared delgada, contra la acción del hielo. En las presas de contrafuertes se resuelve fácilmente esta cuestión, apoyándose en ellos.

"Otra ventaja importante de las presas aligeradas contra las de gravedad macizas es la eliminación de la subpresión. El agua infiltrada por las grietas de la roca tiene fácil salida en los vanos no cubiertos por el hormigón, por lo que su acción sobre los contrafuertes y la pantalla es muy reducida."

Por otra parte, las presas aligeradas ofrecen indudables ventajas sobre las de gravedad macizas, respecto a la vigilancia y facilidad de posibles reparaciones.

Dejando para otra ocasión el estudio del hormigón conveniente para aminorar los peligros de formación de grietas, resistencia a la agresividad de las aguas pobres en cal, etc., exponemos a continuación la posibilidad del empleo de presas de contrafuertes, al objeto de eliminar los inconvenientes apuntados.

Históricamente, la idea de emplear contrafuertes en los muros de sostenimiento para aumentar su seguridad, es tan antigua como estos mismos. En la actualidad podemos observarla, entre otras construcciones, en las rurales, donde interviene el empuje de granos u otras materias; claro es que ni los empujes ni las consecuencias de un posible fracaso son comparables a los que tratamos. En la construcción de presas existen innumerables aplicaciones; algunas de ellas proyectadas con el fin exclusivo de obtener gran economía, resultan inadecuadas para la seguridad absoluta necesaria en estas construcciones, lo que, indudablemente, ha despertado un recelo, redundando en perjuicio de soluciones aligeradas que, posiblemente, aventajan a las de gravedad macizas en lo que toca a la seguridad de la fábrica. Los ingenieros españoles, además de la antigua presa de Aguas Calientes (Méjico), pueden presentar como ejemplos de estas construcciones, la presa de Burguillo y la proyectada para el pantano de La Maya (1).

(1) Gruner. "Einiges über den norwegischen Talsperrenbau". *Schweiz Bauzeitung*, vol. 117. 1941.

(1) Cantero y Romera: "Presa de Burguillo. *Revista de Obras Públicas*, 15 de agosto de 1931 y siguientes. — Martín Alonso: "Presa de la Maya". *Revista de Obras Públicas*, 15 de julio de 1933 y siguientes.

Recientemente hemos proyectado una presa de 55 m. de altura (1), en alta montaña. Después de estudiar cuantiosa bibliografía sobre el asunto, hemos preferido partir de bases generales, metodizando el razonamiento seguido para determinar las dimensiones principales. En nuestra exposición seguimos cronológicamente el desarrollo de nuestras ideas.

El estudio de las presas de gravedad en su forma más simple — macizas de perfil triangular — ha sido realizado por Pigeaud mediante la teoría de la Elasticidad, y aunque sus resultados no pueden admitirse como exactos, entre otras causas por la discontinuidad entre la fábrica y el cimiento, proporciona una guía en el cálculo de las tensiones en función de las inclinaciones de los paramentos.

Pigeaud establece la siguiente condición para que no resulten tensiones de tracción en el macizo a embalse lleno:

$$\Delta m (1 + n^2) (m + n) - (1 - m \cdot n)^2 - \theta (m + n)^2 \geq 0; \quad [1]$$

en donde:

Δ = densidad de la fábrica.

n = talud del paramento, agua arriba.

m = talud del paramento, agua abajo.

θ = coeficiente de subpresión (variable entre 0 y 1).

Siendo H la altura, el peso de la fábrica por metro de paramento vendrá determinado por:

$$P = \frac{1}{2} \Delta (m + n) H^2. \quad [2]$$

Para densidades normales el volumen resulta mínimo cuando $n = 0$ (se excluyen las soluciones en desplome que, por otro lado, producen tracciones a embalse vacío). Determinados los taludes es necesario comprobar que los valores de las tensiones, coeficiente de deslizamiento, etc., no pasan de ciertos límites.

Observando los taludes de las presas aligeradas, concretamente las de contrafuertes independientes, se encuentra diversidad de criterio; así en las presas americanas hay una tendencia hacia el triángulo isósceles, mientras que en las italianas el paramento de aguas arriba permanece vertical. Esta indeterminación puede resolverse mediante una ecuación que debe deducirse de la establecida por Pigeaud.

Se comprende que las variables geométricas que pueden introducirse en este tipo de estructura son ilimitadas, y de su acertada elección se desprenderá el aumento de seguridad y economía. Siguiendo el criterio de no establecer modificaciones en las solucio-

nes clásicas, adoptamos el tipo de contrafuerte triangular de espesor constante; de esta forma, un contrafuerte puede considerarse como una rebanada de una presa triangular maciza, cuya fábrica tiene por densidad la real multiplicada por la relación del ancho de contrafuerte a la distancia entre los ejes de los mismos. Prescindiendo de la subpresión, que en presas aligeradas no influye esencialmente en las dimensiones, se establece la condición para que no existan tensiones de tracción en forma análoga a la ecuación [1]:

$$\Delta' m' (1 + n'^2) (m' + n') - (1 - m' n')^2 = 0; \quad [3]$$

siendo:

$$\Delta' = \frac{d}{D} \Delta \begin{cases} d = \text{ancho de contrafuerte.} \\ D = \text{distancia entre ejes de contrafuertes.} \\ \left. \begin{matrix} m' \\ n' \end{matrix} \right\} \text{taludes de contrafuerte.} \end{cases}$$

El peso será:

$$P' = \frac{1}{2} \Delta' (m' + n') H^2. \quad [4]$$

Interesa determinar los taludes para que resulte el volumen mínimo, por lo que vamos a comparar el de la presa aligerada con un tipo que puede ser el de la Pigeaud sin subpresión. Designaremos por ϵ el tanto por uno de economía alcanzado con relación a ésta. En nuestro caso equivale a comparar los pesos:

$$\frac{1}{2} \Delta' (m' + n') H^2 = \frac{1}{2} \Delta (m + n) (1 - \epsilon) H^2; \quad [5]$$

de donde se deduce:

$$\Delta' (m' + n') = \Delta (m + n) (1 - \epsilon); \quad [6]$$

o bien:

$$m' + n' = \frac{D}{d} (m + n) (1 - \epsilon); \quad [7]$$

sustituyendo [6] en [3], establecemos el sistema:

$$(m + n) (1 - \epsilon) m' (1 + n'^2) - (1 - m' n')^2 = 0; \quad [8]$$

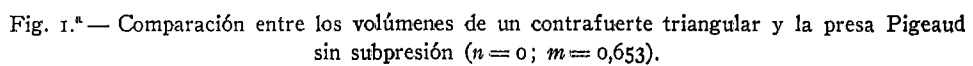
$$m' + n' = \frac{D}{d} (m + n) (1 - \epsilon), \quad [7]$$

teniendo presente que comparamos con la presa Pigeaud, sin subpresión de $\Delta = 2,35$, y, por tanto, $n = 0$; $m = 0,6523$. Valores que, sustituidos en el sistema, lo transforman en:

$$1,533 (1 - \epsilon) m' (1 + n'^2) - (1 - m' n')^2 = 0; \quad [9]$$

$$m' + n' = 0,6523 (1 - \epsilon) \frac{D}{d} \quad [10]$$

(1) Para uno de los Saltos de Energía e Industrias Aragonesas en Sallent (Huesca), a la cota 2100 m.



Fijado un valor para ϵ , la ecuación [9] representa una curva, y la [10], una familia de rectas paralelas; entre éstas hay una tangente a [9] que determina el contrafuerte de mayor ancho relativo, valor que tiene importancia con relación al pandeo, longitud de presa y menor hueco a cubrir entre dos contrafuertes.

Aunque la resolución del sistema establecido no puede darnos la solución exacta por no contar con la influencia de la cabeza, es, sin embargo, de gran utilidad; nos refleja inmediatamente la influencia de la variación de taludes en el volumen de la fábrica, y fijados la separación y el ancho de contrafuertes, podemos determinar aproximadamente la inclinación de los taludes para el menor volumen de la fábrica.

Del examen de las curvas anteriores se deduce que el talud de aguas arriba para la presa de máximo ancho de contrafuerte, compatible con una economía de-

terminada, aumenta conforme vayamos incrementando ésta. En el límite, no realizable, los taludes son iguales a la unidad, y la economía, el 100 por 100.

Estos estudios son aplicables a las presas de bóvedas múltiples y celulares; claro es que, en este último caso, habría que modificar las ecuaciones, al tener en cuenta en la densidad virtual de la fábrica el peso de los tabiques horizontales y posible lastre.

En los gráficos de la figura 1.^a se han representado las curvas [9] para distintos valores de ϵ , y las rectas límites correspondientes a las diversas familias de rectas que representa la ecuación [10]. Los valores de las tensiones son función solamente de la altura de presa, de sus límites y del ancho de contrafuerte; por razones constructivas o de pandeo deduciremos el dimensionado de la misma, pero debe tenerse en cuenta la influencia de la pantalla, como a continuación vamos a exponer.

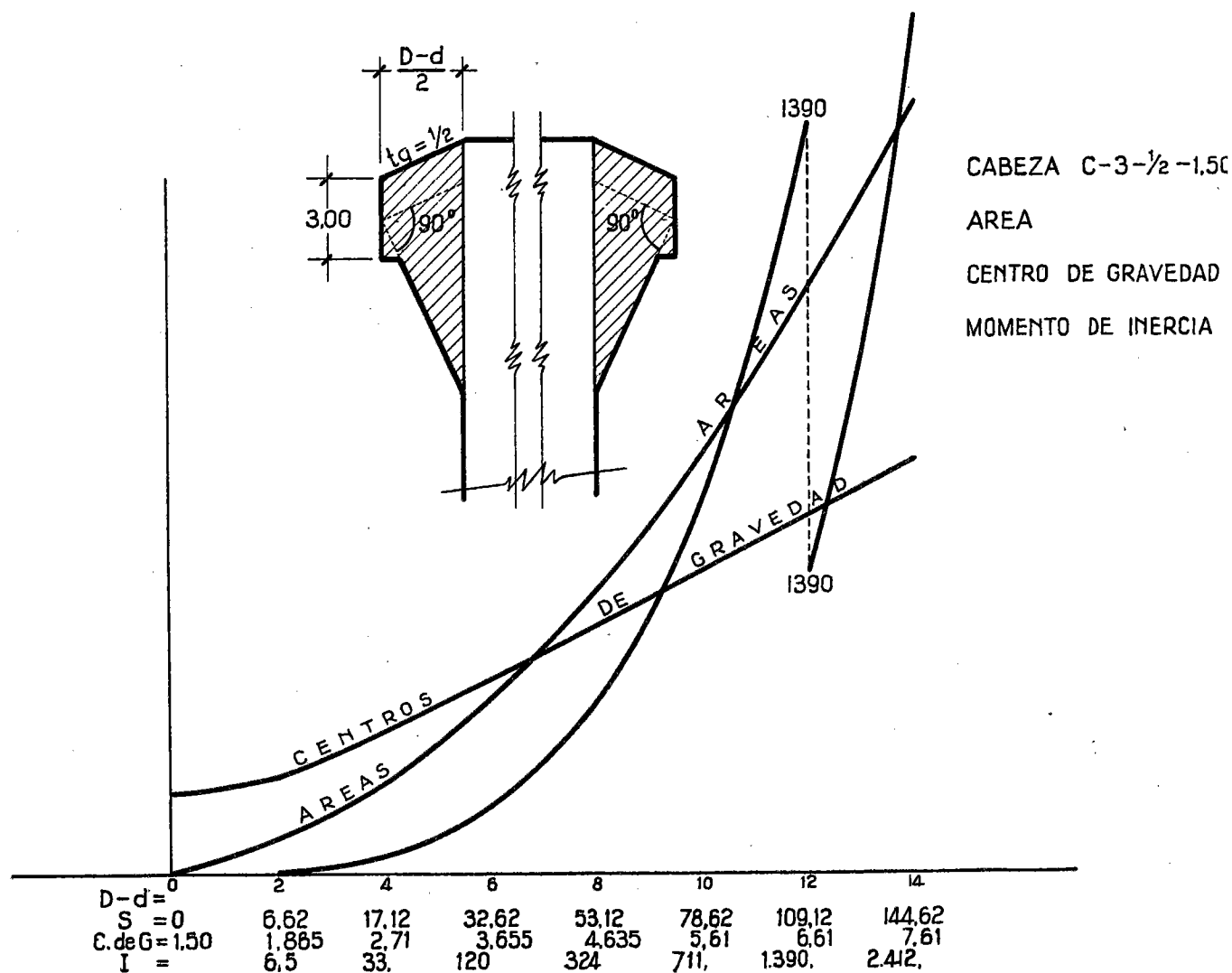


Fig. 2.^a — Características de la cabeza en función de la distancia entre contrafuertes.

Influencia de la cabeza. — Adoptamos un tipo de cabeza de las llamadas de punta de diamante, en la que mantenemos constantes las inclinaciones de los chaflanes, así como los acuerdos con el contrafuerte. La cabeza se compondrá de una parte común al contrafuerte y otra que variará exclusivamente del vano libre entre ellos.

Consideremos primeramente una distancia entre ejes de contrafuertes fija, y vamos a estudiar la va-

Para diferentes distancias entre ejes de contrafuertes tendremos diversas curvas, en las que las ordenadas finales serán iguales, e iguales al valor del volumen de la presa Pigeaud anteriormente mencionada. Los valores correspondientes al espesor de contrafuerte, infinitamente pequeño, crecerán en igual sentido que la distancia entre ejes de los mismos. Esto nos indica que, forzosamente, dos curvas de esta familia tienen que cortarse, y que la envolvente de

VOLUMEN POR METRO DE LAS PRESAS DE VOLUMEN MINIMO PARA $H = 50$ MS Y $C-3-\frac{1}{2}-0$
(SIN SUBPRESION)

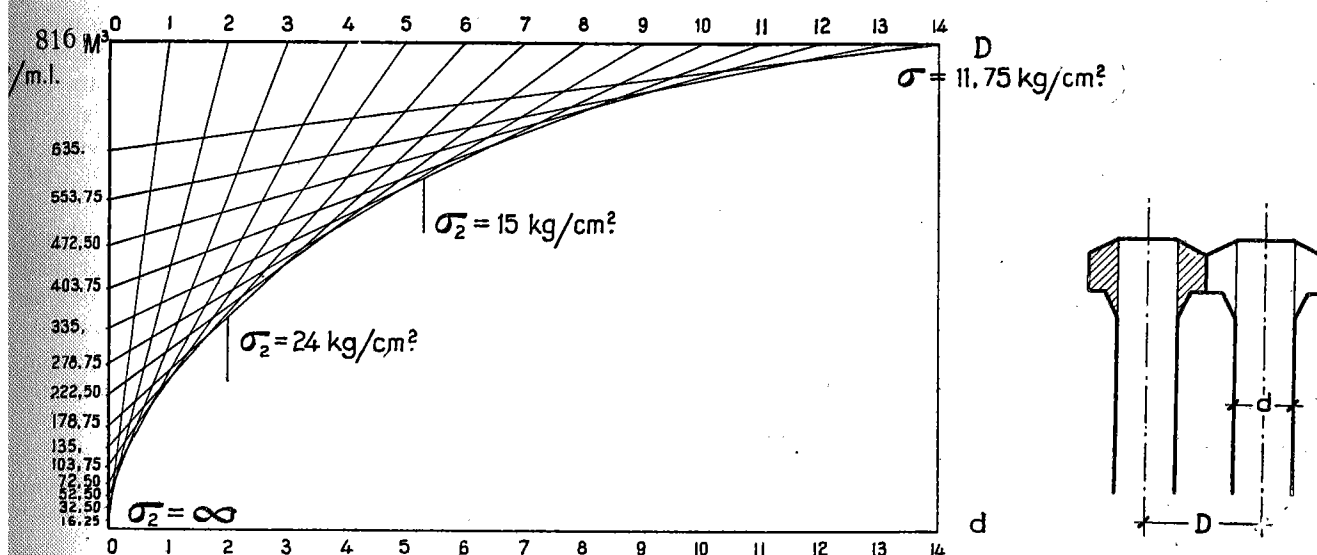


Fig. 3.^a — Variación de los volúmenes mínimos para distintas distancias de contrafuertes.

riación del volumen de la presa en función del espesor de aquéllos. En este estudio preliminar no tenemos presente el efecto de la subpresión.

La presa de menor volumen corresponderá a un espesor de contrafuerte infinitamente pequeño, y el volumen de aquélla será igual al de la cabeza. El volumen crecerá en razón directa con el espesor del contrafuerte, igualándose al de la presa Pigeaud sin subpresión cuando el espesor sea igual a la distancia entre ejes; es decir, cuando el vano libre entre dos contrafuertes contiguos se anule. La representación gráfica de estos valores, tomando en las ordenadas los volúmenes por unidad de paramento y en las abscisas el espesor de los contrafuertes, será una curva que nos permitirá determinar el volumen de la presa de contrafuertes a una distancia determinada en función del ancho de los mismos.

las mismas nos determina, fijado un espesor de contrafuertes, la distancia entre los mismos de la solución de mínimo volumen.

Hay que tener muy presente que las soluciones que se ensayan deben, además, ser compatibles con las tensiones admisibles, esfuerzos producidos en las ménsulas de las cabezas, facilidad de construcción y otras muchas condiciones que son necesarias comprobar.

En la figura 2.^a se representan, para una cabeza determinada, las características de la parte no común al contrafuerte en función de la separación entre los mismos.

Para una altura de presa de 50 m. y con la cabeza anteriormente representada, se han calculado los volúmenes de las presas de volumen mínimo con diferente distancia entre ejes de contrafuertes y espesor

de los mismos. Es interesante resaltar que, para este caso particular, la representación del volumen por metro para una distancia entre ejes fija, no difiere sensiblemente de una recta (fig. 3.^a) — se calcularon con exactitud cinco valores para la distancia de 10 m., y otros tantos para 12 m. —. Así, por ejemplo, para un contrafuerte de 5 m. de espesor, determinamos, con la ayuda del gráfico, que la presa más económica es para una distancia entre ejes de 10 m., y su volumen por m. es de 630 m.³, representando una economía de 40 por 100 con relación a la presa Pigeaud sin subpresión.

Efecto de la subpresión. — Al considerar la subpresión, las ordenadas máximas de las distintas curvas que representan los volúmenes por unidad de paramento para las diferentes distancias entre ejes de contrafuertes no serán iguales, y variarán entre la correspondiente a la Pigeaud sin subpresión para distancia entre contrafuertes cero y la correspondiente a la Pigeaud con coeficiente de subpresión considerado para distancia de contrafuertes suficientemente grandes. Los razonamientos anteriores subsisten y la ordenada de la asíntota de la envolvente se desplazará hasta este último valor.

Influencia de la cabeza con relación a los contrafuertes aislados. — La consecuencia fundamental que se deduce de los estudios anteriores es que, fijada la altura de presa, con un tipo de cabeza determinado y un espesor determinado de contrafuerte, existe una distancia entre ellos que nos da el volumen mínimo. Esta consecuencia es intuitiva; pero las curvas deducidas tienen el valor de acercarnos al valor cuantitativo de lo que sólo cualitativamente puede darnos la

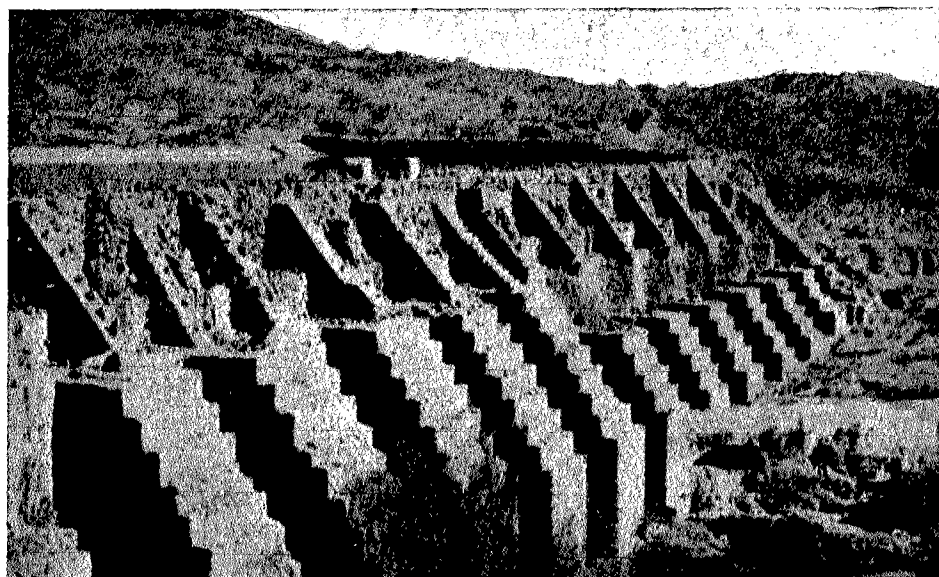
intuición. Por otra parte, tenemos expresada gráficamente la discusión de variación de cualquier elemento de la presa.

Para un aumento de la altura de la presa se deduce fácilmente — considerando un cambio de escalas en el gráfico — la conveniencia de separar los contrafuertes. No hay que perder de vista que la economía máxima no debe buscarse para la máxima altura, pues debe hacerse según la forma de la cerrada.

Diferentes tipos de presas de contrafuertes. — Hasta ahora hemos estudiado una presa de contrafuerte triangular de ancho y cabeza constantes. Hemos visto que, sin tener en cuenta la cabeza, la presa considerada no se separa en absoluto de la clásica de Pigeaud. Parece natural dar a la cabeza una variación progresiva desde la coronación a los cimientos, pero como hay que partir de unas dimensiones mínimas en coronación y éstas son mayores — no siendo la presa de gran altura — que las necesarias para garantizar la impermeabilidad y resistencia en la zona de cimientos, no resulta precisa esta variación, lo cual, por otro lado, nos proporciona gran ventaja en el aspecto constructivo.

Las fuerzas principales que actúan sobre el ensanchamiento de la cabeza son de dirección radial, por lo que no producen perturbación en las líneas de tensiones del contrafuerte. El efecto de la componente del peso de las aletas de la cabeza en dirección normal al talud es despreciable para valores no muy grandes de éste.

Ensanchamiento en el paramento de aguas abajo. La idea de aumentar la estabilidad estática y elásti-



Presas de Aguas Calientes
(Méjico).

ca mediante el aumento de la inercia en la sección horizontal por un ensanchamiento en la parte posterior es muy discutible. Con relación a la economía, el aumento de volumen es muy apreciable. Por otro lado, el ensanchamiento posterior producirá una dispersión de las isostáticas, dando lugar a tensiones de tracción (1) en dirección transversal, con el peligro de formación de grietas y, además, al apartarse grandemente del tipo de la presa Pigeaud, el cálculo de las tensiones por las hipótesis de deformación plana es algo ilusorio.

El ensanchamiento del paramento posterior llevado al extremo que cierre completamente el interior de la presa tiene la ventaja de aislamiento y arriostramiento. Y el mismo resultado se consigue mediante una pantalla de pequeño espesor que puede reforzarse en los lugares donde se teman desprendimientos de bloques, o por otras causas.

Las variaciones de espesor en el contrafuerte, como asimismo el cambio de inclinación de los taludes,

producen una desviación de las isostáticas que pueden dar lugar a tensiones locales de tracción. Desde el punto de vista del cálculo, se separan del tipo de la presa Pigeaud, siendo, por tanto, menos razonable emplear sus hipótesis. Sin embargo, en presas de gran altura es conveniente emplear ensanchamiento en los contrafuertes, haciéndolo gradualmente y de pequeña inclinación para no introducir tensiones adicionales importantes.

Por otra parte, la sencillez de forma conduce a una mayor simplicidad de cálculo y construcción, elimina los puntos oscuros y delicados de la fábrica, siendo éstas razones para ensayar, en primer lugar, una presa según las directrices expuestas.

No hay que perder de vista que en el proyecto de una presa, como en general de cualquier estructura, hay que fundarse principalmente en las que, ya construídas, han probado sus buenos resultados, sirviendo los razonamientos anteriormente expuestos para tener un criterio de juicio o poder mejorar en algún sentido la que proyectamos, pero nunca salirnos de lo que tienen de esencial las admitidas plenamente por la experiencia.

(1) Akira Miura: "Spannungskurven in rechteckigen und Keilförmigen Trägern". Berlín, 1928.