

# EVOLUCION EN LA CONCEPCION Y PROYECTO DE LAS PRESAS BOVEDA

Ing. C. C. P. R. LOPEZ

8

*Poca cosa es la vida si no piata en ella un afán formidable de ampliar sus fronteras. Toda obstinación en mantenernos dentro de nuestro horizonte habitual, significa debilidad, decadencia de las energías vitales.*

ORTEGA

Pasamos en este artículo, una revista al desarrollo y evolución de formas y dispositivos de las presas concebidas para trabajar en arco o bóveda, dando y comentando las razones que provocaron e introdujeron las sucesivas modificaciones para llegar a formas cada vez más cerca de una perfección ideal. También se examinan —en relación con este tipo de presas— los principales tipos de aliviaderos y de órganos de desagüe.

## 1. EL TRABAJO EN ARCO. LA PRESA CILINDRICA.

1.1. Parece natural que, desde antiguo, se ocurriese dar a las presas de fábrica —cuando la cerrada no era ancha— la forma arqueada, de manera que el trabajo en arco de la estructura, y por tanto, el logro de la trans-

misión del empuje hidrostático preponderantemente hacia las laderas —canalizado a través de los arcos—, supusiese un considerable ahorro respecto de la masa de fábrica necesaria para resistir aquel empuje simplemente por rozamiento con la roca.

Empleándose en un principio las presas en arco, para cerradas de una baja relación de luz a altura, era correcta la suposición de que los arcos (es decir, los que resulten de dar una serie de secciones horizontales a la presa) soportasen prácticamente toda la presión hidrostática, siendo lógico darles a aquéllos la forma antifunicular de este empuje hidrostático.

El antifunicular de una carga normal variable es (\*):

$$\rho \cdot p = N = \text{constante} \quad (1.1).$$

En el supuesto de que el arco soporte toda la carga hidrostática, será el antifunicular un círculo ( $\rho = r$ ) con reacciones en los extremos  $N = r \cdot p$ , y una compresión uniforme en cualquier sección, igual a:

$$\frac{r \cdot p'}{e} \left( p' = p \frac{r_e}{r} \right) \quad (\text{fig. 1.2, a}).$$

Según esta simple teoría, la forma más sencilla y lógica a dar a la presa, sería la del cuerpo de revolución, engendrado por una sección de forma aproximada trapecial, al girar alrededor de un eje vertical. Con ello quedaría:

$$\sigma = \frac{p' \cdot r}{e} \quad (1.2);$$

(\*) Se deduce fácilmente, de una forma general —que nos será útil para después— esta ecuación del antifunicular de una carga normal variable con  $S$ :  $p = f(s)$  (fig. 1.1) proyectando las fuerzas que equilibran un elemento diferencial del arco sobre la normal y la tangente, despreciando infinitésimas de segundo orden. (No existe ni  $M$  ni  $Q = \frac{dM}{ds}$ ; por la suposición de que el arco es antifunicular de la carga que actúa sobre él.)

$$\left. \begin{aligned} 2N d\left(\frac{\varphi}{2}\right) &= p \cdot ds \\ dN &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{de donde } \rho \cdot p = N = \text{Cte.} \\ &\text{siendo } \rho = \frac{ds}{d\theta} \end{aligned}$$

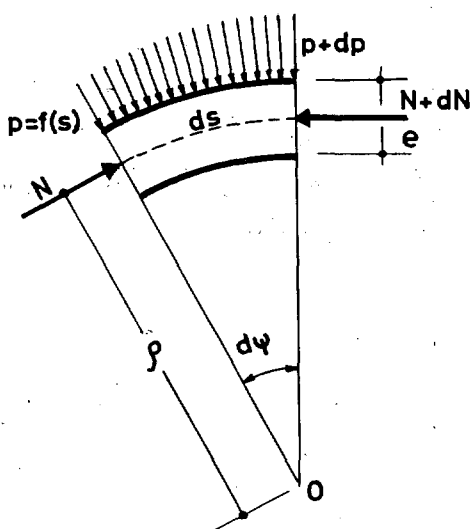


Figura 1.1.

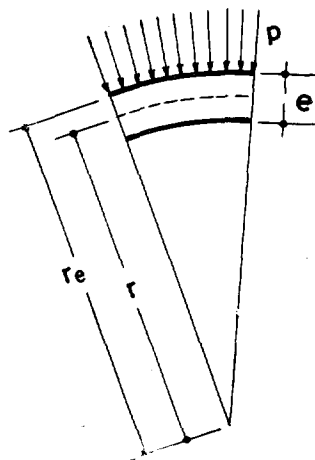


Figura 1.2, a.

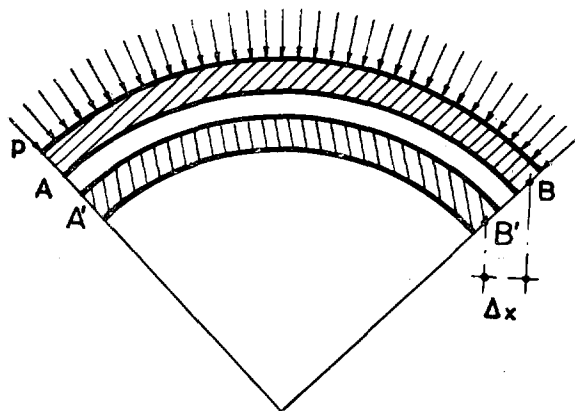


Figura 1.2, b.

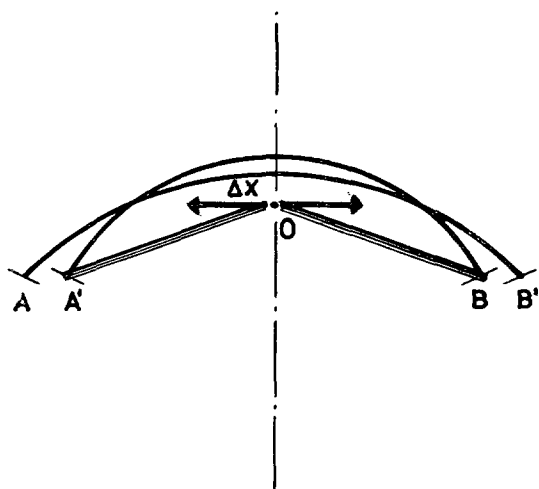


Figura 1.2, c.

constante a lo largo de cada arco, y al crecer  $p'$  con la profundidad, con tal de que fuese:

$$\frac{p'}{e} \sim \text{Cte.}$$

1.2. Esta sencilla y conocida "fórmula de los tubos" no tiene en cuenta el efecto de empotramiento de los arcos por sus extremos. Veamos la modificación que supuso la introducción de este efecto en la ley de espesores y otras características de los arcos.

El arco circular  $AB$  (fig. 1.2, b) de espesor uniforme (\*), supuesto apoyado sobre unos apoyos radiales ideales que no ofrecen resistencia al rozamiento, se acorta por efecto de la compresión uniforme que provoca el empuje hidrostático, motivando un acortamiento horizontal  $\Delta x$  en cada uno de sus extremos.

Como el empotramiento no consiente estas traslaciones, se deben aplicar unos esfuerzos  $\Delta X$  en los extremos  $A'$  y  $B'$  que los restablezca a su posición primitiva.

Como es sabido, para introducir la traslación —sin giro— de los extremos del arco, basta aplicar en el centro elástico  $O$  dos fuerzas iguales y opuestas, ligadas a los extremos por dos barras infinitamente rígidas, y de magnitud igual a:

$$\Delta X = \frac{\Delta x}{l_{xx}} = (1.3);$$

siendo  $l_{xx}$  el m.d.i. de los pesos elásticos respecto a la recta que sustenta  $\Delta X$ .

El estado tensional del arco está integrado por el estado 1 (fig. 1.2, b) más el estado 2 (fig. 1.2, c).

El primero motiva —como vimos— una compresión uniforme, y el segundo una flexión, principalmente, aparte de una tracción y esfuerzo cortante de menor importancia. La ley de momentos flectores se representa en la figura 1.4, siendo éstos  $M = y \cdot \Delta X$ , en donde  $\Delta X$  tiene el valor dado en (1.3).

(\*) El caso más general de un arco de espesor y curvatura variable, asimétrico, sustentando una carga de agua también variable, no ofrece complicación conceptual, pero hemos razonado sobre el caso anterior, para seguir, según nuestro propósito, la evolución cronológica de formas.

En este caso completamente general, el arco  $AB$  está en equilibrio bajo dos fuerzas que sobre él actúan (fig. 1.3), siendo  $aa'$  un antifunicular arbitrario de la carga hidrostática. Bajo este primer estado de fuerzas los extremos  $A$  y  $B$  del arco experimentan unas traslaciones y giros  $\omega'_A, \delta'_A$  y  $\omega'_B, \delta'_B$ , y el terreno otras  $\Omega'_A, \Delta'_A$  y  $\Omega'_B, \Delta'_B$  respectivamente.

Las dos fuerzas iguales y opuestas  $\Delta X$  de la figura 1.2, c, aplicadas sobre los extremos del arco, provocan los corrimientos  $\omega''_A, \delta''_A$  y  $\omega''_B, \delta''_B$  de sus extremos, y los homólogos  $\Omega''_A, \Delta''_A$  y  $\Omega''_B, \Delta''_B$  del terreno de cimentación.

La posición y magnitud de las fuerzas  $X$  debe ser tal que se verifique:

$$\omega'_A + \omega''_A = \Omega'_A + \Omega''_A \quad \text{y} \quad \delta'_A + \delta''_A = \Delta'_A + \Delta''_A$$

Y lo mismo para el extremo  $B$ .

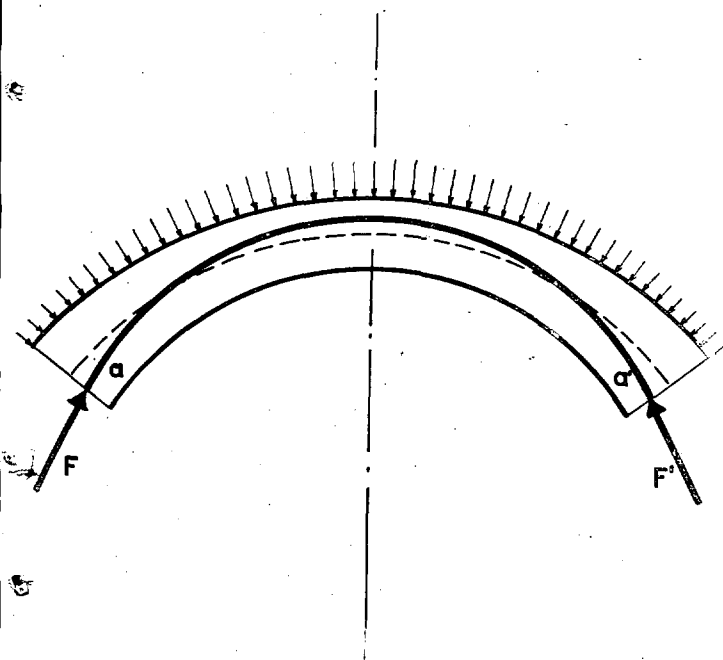


Figura 1.3.

Esta forma, muy física, de llegar al estado tensional del arco, nos permite ver cómo repercuten en aquél los parámetros que definen el arco. Para una misma cuerda y presión se ve que:

- Las tensiones máximas —y el trabajo de flexión— crecen con el radio, o lo que es lo mismo, cuando disminuye el ángulo central.
- El trabajo de flexión crece al aumentar el espesor del arco.
- Las máximas tracciones y compresiones aparecen en

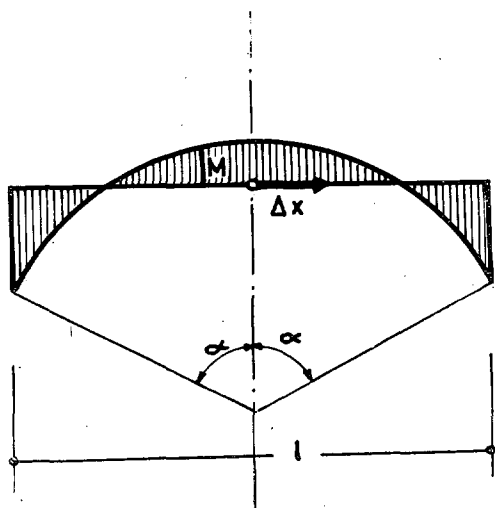


Figura 1.4.

el extradós e intradós de arranques, respectivamente, seguidas de las experimentadas en clave.

Estas deducciones motivaron:

- Que se tendiese a dar a los arcos el máximo ángulo posible en el centro, compatible con una aceptable incidencia de éstos en el terreno.
- Adelgazar, cada vez más, las presas para eliminar el trabajo de flexión, y acercarse todo lo posible al ideal de membrana a compresión.
- Prescindir, en los arcos, de las partes traccionadas, limitando el arco a su parte activa.
- El engrosar los arcos hacia arranques, por corresponder a esta zona las mayores tensiones.

El aumentar el ángulo en el centro y reducir la bóveda a su parte activa, se ve constreñido por los desplomes que se originan en las ménsulas, y, sobre todo, por ser preponderante el lograr una favorable incidencia de los arcos.

De esta forma surge la presa de paramento cilíndrico aguas arriba y espesores variables, crecientes, hacia el fondo y hacia arranques.

Actualmente, este tipo de presa ha quedado relegado a pequeñas obras, o a valles muy estrechos o en forma de U.

## 2. EL TRABAJO CONJUNTO DE LOS ARCOS Y LAS MENSULAS. LA PRESA DE DOBLE CURVATURA.

2.1. Todo lo que antecede se está fundamentando en el supuesto de que los arcos soportan toda la carga hidrostática, no contando por tanto con el trabajo de la presa según planos verticales.

Naturalmente las cosas no ocurren así, sino que la estructura trabaja como cúpula empotrada más o menos rígidamente en el terreno a través de todo su contacto con él, transmitiéndole todo el empuje hidrostático que soporta, a lo largo de todo este perímetro de contacto.

Su carácter de cúpula le da una gran hiperestaticidad intrínseca, y su forma de sustentación una gran hiperestaticidad extrínseca. Este alto grado de hiperestaticidad es una de las características fundamentales de este tipo de presas; y es de aquí de donde emana su enorme flexibilidad para adaptarse a múltiples formas distintas de estados de esfuerzos perimetrales de contacto, impuestos por la heterogeneidad y anisotropía del terreno, nunca perfectamente conocido. Es ésta una ventaja que nunca se valorará lo suficiente; pero es también de su alta hiperestaticidad de donde nacen las mayores dificultades de concepción y cálculo de este tipo de presas.

2.2. De todos es conocida la abstracción — para entrar algo en esta forma de trabajo — de suponer idealmente dividida la estructura por una serie de planos horizontales y otras de planos (algunas veces superficies helicoidales) verticales, que delimitan unos arcos horizontales y una serie de ménsulas verticales, compartiendo el empuje hidrostático en cada punto entre la ménsula y arco que se cruzan en él, de forma que los desplazamientos y giros sean iguales para ambos.

Según el número de arcos y ménsulas en que se divide la estructura, así como los desplazamientos y giros que se consideren, tendremos un ajuste más o menos completo. El desplazamiento más importante se comprende que sea el radial, seguido del tangencial, según los arcos, y las rotaciones, según los ejes (tangentes de la fibra media) de las ménsulas y arcos, y finalmente el desplazamiento según la tangente a las ménsulas. Pero todos estos ajustes no son independientes, sino que están ligados por las ecuaciones de compatibilidad.

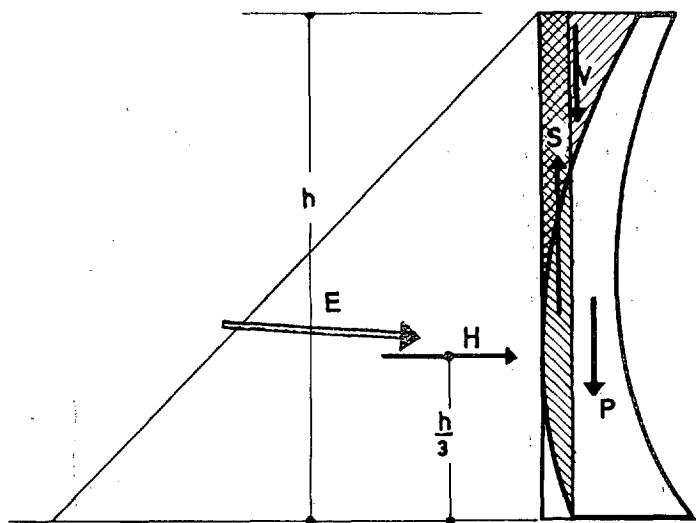


Figura 2.1.

2.3. La figura 2.1. ilustra claramente que el empuje total  $E$ , que actúa sobre un elemento vertical (ménsula) de presa de un ancho unidad, es:

$$\begin{array}{c} \rightarrow \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad \rightarrow \\ E = H + V + S. \end{array}$$

Para efectuar el cálculo tensional de la estructura, se acostumbra normalmente a hacer la repartición del empuje horizontal hidrostático  $H$ , entre arcos y ménsulas, según dijimos, suponiendo que los empujes verticales  $V$  y  $S$ , así como el peso de la estructura  $P$  gravitan sobre las ménsulas únicamente. Esta hipótesis puede aceptarse desde que el movimiento que determinan  $V$ ,  $S$  y  $P$  sobre la ménsula es normalmente un giro hacia aguas arriba y, por tanto, compatible con el que permiten las juntas (supuestas helicoidales o planas, pero sin redientes).

Pero si este movimiento fuese hacia aguas abajo (caso de presas desplomadas hacia aguas abajo) se deberá también, en rigor, efectuar la repartición de las fuerzas  $V$ ,  $P$  y  $S$ , si eventualmente existe también esta última.

Sentado esto, examinemos — de una manera cualitativa — cómo la forma de la repartición de la presión horizontal  $H$  entre arcos y ménsulas, indica la forma que debe darse a las ménsulas.

La forma de la curva de repartición de presiones entre arcos y ménsulas, para una cerrada de características normales, tiene el aire que indica la figura 2.3, a, a la que corresponde la ley de momentos flectores de la figura 2.3, c, que produce en los paramentos de la ménsula las tracciones que se indican por una línea gruesa en la figura 2.3., b.

Con objeto de contrarrestar estas tracciones en lo que sea posible, por el peso propio, se dio a las ménsulas la forma que se indica en esta figura, creando una ley de momentos por este efecto del peso y de los empujes hidrostáticos verticales  $V$  y  $S$ , antes mencionados (2.3.), sensiblemente opuesta a la debida a la presión hidrostática.

La curvatura en el sentido vertical viene limitada por las tracciones que se producen, a embalse vacío, en el pie de aguas abajo de las ménsulas centrales y en la mitad superior de las mismas del paramento de aguas arriba. Estas últimas son de menor importancia, ya que en la realidad vienen aminoradas por apoyarse unas ménsulas en otras y aparecer el efecto de arco.

La técnica avanzada de la fabricación y puesta en obra de hormigones, ha permitido aceptar tracciones en vacío de 25 Kg./cm.<sup>2</sup>, lo que ha contribuido notablemente a poder prescindir de las partes de hormigón, que para la hipótesis de embalse lleno permanecen traccionadas o con compresiones flojas, delimitando así la estructura a su parte esencialmente activa.

Sobre los dispositivos existentes para aminorar estas tracciones en vacío — que se pueden ver agravadas por un aumento de temperatura — volveremos en el apartado 6.

2.4. Para presas de gran luz en relación con su altura, o para cerrar valles en forma de  $U$ , con la relación anterior algo crecida, aparecen fuertes tracciones en el pie de aguas arriba de las ménsulas centrales, ya que éstas difícilmente pueden seguir las deformaciones impuestas por los arcos, de gran luz, muy flexibles.

Existen nuevas técnicas para aprovechar las ventajas de la bóveda, empleando este tipo de presas para cerrar valles de las anteriores características. Trataremos sobre estas técnicas en el apartado 3.1 y 6, hablando aquí solamente de cómo puede utilizarse la forma de la ménsula para aminorar estas tracciones.

En primer lugar, cabe dar un fuerte desplome en el pie de aguas arriba, de forma que por efecto del peso propio (más las fuerzas verticales hidrostáticas  $S$  y  $V$  de la figura 2.1) motiven unas fuertes compresiones compatibles con las máximas tracciones permisibles, que aparecerán, para embalse vacío, en el pie de aguas abajo. Para evitar estas tracciones cabe utilizar unos apoyos, que se pretende que sólo funcionen para embalse vacío (ver apartado 6.4).

Es obvio decir que, para cubrir cerradas de las características antes citadas, conviene engrosar las ménsulas (y por tanto, la presa) uniformemente. Pero además es favorable el engrosar las ménsulas en su parte superior (lo que equivale a engrosar el arco superior), de forma que éstas se apoyen en los arcos superiores

y disminuyan los momentos flectores en la base de las ménsulas.

Finalmente, algunas veces, paradójicamente, conviene adelgazar las ménsulas centrales en su parte inferior, de forma que al aumentar su flexibilidad tomen menos carga. Pero habrá que proceder con cautela porque la disminución de la inercia puede aumentar más las tracciones, de lo que se ha logrado aminorarlas por la disminución de la carga.

2.5. Aun contando con la curvatura de las ménsulas, si los centros de los arcos estuviesen todos en una misma vertical, los inferiores serían, en relación con la cuerda, de gran radio y muy pequeño ángulo central, lo que provocaría un considerable aumento de las zonas trac-

ras, sucede normalmente que si se quiere mantener aproximadamente constante (o al menos no considerablemente menor) el ángulo central de los arcos inferiores en relación con los superiores, se encuentra el proyectista con un fuerte desplome de algunas ménsulas laterales, que no solamente provocan inadmisibles tracciones — para embalse vacío — en su pie de aguas abajo, sino que también son inestables en estas condiciones.

Con el fin principal de soslayar este inconveniente, aun diseñando a todos los niveles el arco activo, surge la presa bóveda “desplomada hacia aguas abajo”. Este tipo de presa permite, sin duda — en cuanto a la estructura —, mantener el ángulo central constante y hacer trabajar así muy uniformemente a compresión todos los ar-

### LEY DE MOMENTOS PRODUCIDOS POR EL PESO DE LA PRESA Y CARGA HIDROSTATICA VERTICAL

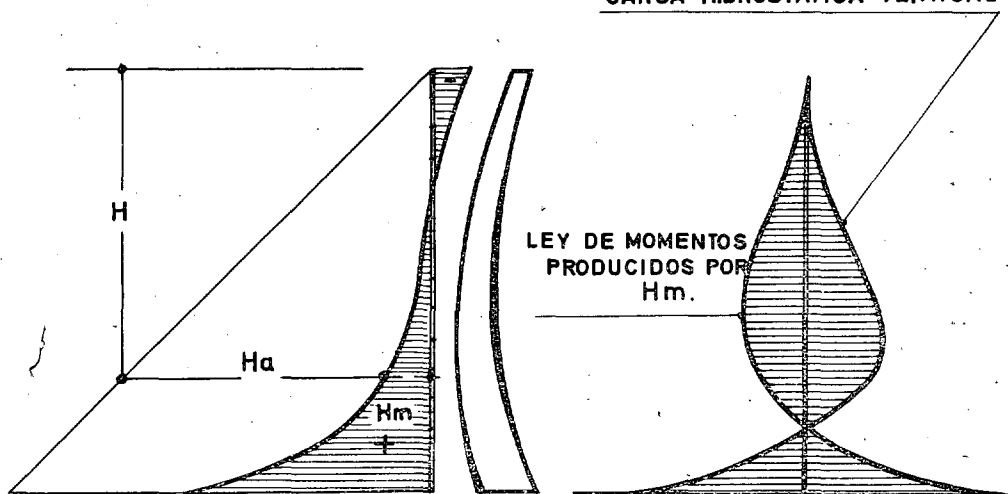


Figura 2.3, a

Figura 2.3, b.

Figura 2.3, c

cionadas y de las tensiones en general (tanto de compresión como de tracción).

Se ocurre entonces el ir disminuyendo los radios de los arcos a medida que éstos son más profundos y el vallé se estrecha.

Nace así la “bóveda pura”, la bóveda de doble curvatura con radios centrales variables que aprovecha mucho mejor el material, desechando las partes traccionadas o poco comprimidas.

Este tipo de presas se suele proyectar de forma que las ménsulas sean autoestables no sólo para la obra terminada, sino también para el período de construcción que da mayor excentricidad del centro de gravedad de cada ménsula.

2.6. Aparte de que — como veremos después — es recomendable el no aumentar excesivamente los ángulos, ya que uno de los fines principales a observar es el conseguir una favorable incidencia de los arcos en las lade-

cos, lo que en ciertos casos puede redundar en un cierto ahorro de volumen con el tipo anteriormente descrito.

Otras ventajas son:

- Permite fácilmente el proyectar un aliviadero verdadero de gran desarrollo, ya que la lámina se aleja más de la fundación.
- El peso del agua que gravita sobre ella, colabora eficazmente a aumentar su seguridad al deslizamiento. Por contra tiene los inconvenientes:
- El peso propio de la estructura, así como el del agua que gravita sobre ella, aumentan de una manera considerable las tensiones de los arcos (como si la presión  $p$  viniese multiplicada por  $\frac{1}{\cos^2 \beta}$ ).
- Sólo se pueden permitir pequeños desfases en los bloques de hormigonado, ya que las ménsulas sólo son estables al apoyarse unas en otras.

- Finalmente, las tracciones — mayores que las normales — que en estas obras aparecen en el pie de aguas arriba son peligrosas, pues abierta una fisura, la retracción o una disminución de temperaturas la agravan, sin otra posibilidad de pararlas que la ménsula llegue a apoyarse a las contiguas.

Normalmente estos inconvenientes no compensan las ventajas anteriores.

### 3. LOS ARCOS DE CURVATURA VARIABLE

3.1. En una presa de arcos de espesor creciente de clave a arranques — como es normal —, a medida que nos vamos desplazando de la ménsula central hacia las laderas, las ménsulas, cada vez más rígidas, toman más carga hidráulica, descargando en consecuencia los arcos. Resulta así una ley de carga para los arcos — especialmente para los superiores — decreciente de clave a arranques. Para acercarnos al antifunicular de esta ley de cargas (\*), es preciso utilizar arcos de curvatura decrecientes de clave a arranques, ya que según vemos en 1.1 el radio de curvatura multiplicado por la presión que soporta el arco en cada punto, debe ser igual a una constante que es precisamente el esfuerzo axial que actúa a lo largo de todo el arco.

Observemos también que el hecho de que la fibra media del arco se acerque al antifunicular de la carga que soporta, no sólo supone una mejora tensional en el arco al trabajar éste más a compresión, sino que esto redundará también en una notable mejora del estado tensional de las ménsulas, ya que disminuyen las flechas de los arcos (y por tanto, los corrimientos de las ménsulas) al estar aquéllas motivadas, principalmente, por el trabajo de flexión. Esta disminución de los corrimientos de las ménsulas tiende a evitar, o al menos aminorar considerablemente, las tracciones en las mismas, al disminuir en ellas el trabajo a flexión.

Es ésta una de las técnicas a que aludíamos en el apartado 2.4 para disminuir las molestas tracciones, que para embalse lleno y disminución de temperatura, aparecen en el pie de aguas arriba de las ménsulas centrales desde que la relación de cuerda a altura pasa de 2 ó 3 (en el apartado 3.3 volveremos sobre este punto).

3.2. Aparte de esta ventaja acabada de exponer, tiene el arco de curvatura variable otras ventajas, de las que trataremos a continuación:

- En los arcos circulares, si se quiere mejorar su incidencia con las laderas conservando constante la tensión media  $\frac{p \cdot r}{e}$ , se le debe engrosar en la misma proporción que nos veamos precisados a aumentar  $r$ . En cambio, en los arcos de curvatura variable, un aumento ligero del espesor, conservando constante la tensión media, no sólo permite un incremento del ra-

dio en clave, sino que también, al hacerse más preponderante el trabajo en ménsula, a medida que nos acercamos a arranques, nos permite aumentar el gradiente de la variación del radio de curvatura, mejorando, por ello, rápidamente las incidencias. El mismo efecto causa el engrosar los arranques.

- Si al hacer las excavaciones, se ve la necesidad de llevarlas a una profundidad mayor que la prevista en el proyecto, por los sondeos, galerías, etc., existe con este tipo de arcos una gran flexibilidad para adaptarse a esta eventualidad sin empeorar prácticamente sus incidencias, ya que la curvatura decreciente, con el desarrollo del arco, permite considerables incrementos de éste sin casi aumentar el ángulo central.

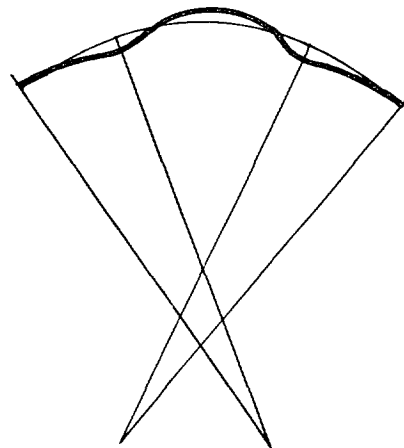


Figura 3.1.

3.3 Como arcos de curvatura variables se utilizan normalmente:

- parábolas,
- elipses,
- arcos circulares de tres centros,
- espirales logarítmicas,
- caracoles de Pascal.

Con las cuatro últimas curvas, como se dispone de dos parámetros al menos, se puede fijar — para una cuerda dada — el ángulo en el centro y la relación de radios (central y extremo).

Con la parábola, si se sitúa el vértice coincidente con la clave del arco, elegido un parámetro (ángulo o relación de radios), el otro viene fijado. Si se quiere disponer de dos parámetros será preciso que la clave del arco no coincida con el vértice de la parábola, con lo que se complica su definición analítica.

Aunque el empleo de los arcos de curvatura variable ha supuesto un gran avance para el empleo y diseño de las presas bóveda, su utilización no es siempre apropiada y puede ser, incluso, perjudicial.

Para cerradas estrechas, de relación cuerda a arco inferior a 2, su utilidad es prácticamente nula.

Pero no sólo interviene para su apropiada utilización la anterior relación, sino también la forma del valle.

(\*) Es imposible llegar al antifunicular ideal por el embotamiento de los arcos.

En valles en V de relación cuerda a altura algo crecida, las ménsulas laterales se cargan con casi toda la presión hidrostática, y será, pues, muy conveniente la utilización de estos arcos. Mayor será aún para valles en V con laderas convexas.

En valles en U rebajados, el proyectista puede verse tentado de utilizar estos arcos para disminuir las fuertes tracciones del pie de aguas arriba de las ménsulas centrales. En este caso creemos que se debe proceder con cuidado por lo que sigue.

En este tipo de valles los arcos toman una carga cerca de la uniforme. Entonces, si suponemos, por ejemplo (fig. 3.1), un arco de tres centros, los mayores empujes que ejercen los laterales sobre el central obligan a desplazarse y a girar los puntos de contacto hasta que se nivelen estos empujes. Resulta de esto una notable mejora de la ménsula central, ya que este movimiento la impulsa hacia aguas arriba. Lo contrario ocurre para las ménsulas y arcos laterales, donde aparecen fuertes flexiones, siendo especialmente de temer esta circunstancia, ya que la resistencia de una bóveda se fundamenta esencialmente en el trabajo de los arcos.

Finalmente, será necesario advertir que los arcos de curvatura variable someten a las laderas a un empuje mayor que el arco circular para igual cuerda, incidencia y ley de cargas. Esto no debe perderse de vista especialmente al proyectar estribos de gravedad en las partes superiores en que la ladera se suaviza y desvanece.

#### 4. LA ASIMETRÍA

4.1. Muy rara vez la asimetría topográfica impide el proyectar una presa bóveda delgada, cuando las características geomecánicas de la fundación son satisfactorias.

Generalmente, puede incluso adoptarse una bóveda con definición geométrica simétrica (todos los arcos tienen, en su definición, un plano común de simetría), aunque la curva de contacto con el terreno sea fuertemente asimétrica.

Hasta hace una década, se procuraba, normalmente, el dejar artificialmente la cerrada simétrica, por medio de excavaciones suplementarias (sobre las precisas para llegar a una cimentación favorable), estribos y zócalos de hormigón. Esta modalidad venía impuesta, en gran cuantía, por la simplificación que suponía para el cálculo de la estructura. Hoy en día, los ordenadores electrónicos permiten obtener, en poco tiempo, el estado tensional de una estructura, no sólo asimétrica en su contorno, sino, incluso en ciertos casos, en su definición geométrica. Los cálculos y ensayos efectuados en modelo reducido, han demostrado la inutilidad de la anterior práctica; y además, por otra parte, las disimetrías geomecánicas de la cerrada, motivan muchas veces disimetrías tensionales mayores que las derivadas de una fuerte disimetría geométrica.

Lo acabado de decir, no va en contra de proyectar un zócalo a lo largo del perímetro de contacto, ensancha-

do hacia aguas abajo, de forma que centre la resultante de acción del arco sobre el terreno. Pero esto de forma que la superficie del zócalo sea sensiblemente paralela a la de la cerrada geológica.

4.2. No obstante lo dicho, se puede en ciertos casos, sin complicación sensible, el encajar una estructura disimétrica, en la que las normales en clave a los arcos a los distintos niveles son coplanarias, pero los desarrollos de estos son distintos, a cada lado del plano anterior, en cuanto a su ley de curvaturas, espesores o ambas cosas a la vez (\*).

Finalmente, cabe el situar los arcos a cada nivel, de manera que se llegue a una incidencia favorable y a un desarrollo semejante a ambos lados de la clave, engendrando entonces las normales en clave a los arcos, una helicoide de plano director horizontal. Esta definición geométrica complica notablemente el cálculo y replanteo de la estructura.

Las prácticas acabadas de describir, superabundantes para resolver cualquier problema de disimetría geométrica, son también normalmente suficientes para solucionar los problemas impuestos por las disimetrías mecánicas de la fundación.

#### 5. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (LA PRESA Y EL TERRENO)

5.1. Ya hemos hablado — apartado 2.1 — del alto grado de hiperestaticidad que tiene la repartición de esfuerzos de una presa bóveda, a lo largo de su contacto con el terreno.

Se comprende el enorme interés que tiene la determinación de estos esfuerzos, desde que, como es sabido actualmente, la seguridad de una bóveda radica principalmente en la posibilidad de organizarse el terreno para resistir estos esfuerzos, sin desplazamientos excesivos, que puedan provocar la rotura de la estructura.

En las primeras épocas de la técnica de las estructuras bóveda, se descuidó esta parte fundamental del proyecto, cuidando únicamente de que las acciones teóricas de los arcos sobre la cimentación interesasen un volumen importante de roca, de forma que se intuyese que no era posible un deslizamiento. Sólo se consideraba, pues — de una manera cualitativa —, la incidencia de los arcos en relación con la topografía de la cerrada. Pero aun, a veces, esta preocupación se vio minada por el afán de dar un gran ángulo central a los arcos (\*\*), para que evitando en lo posible el trabajo a flexión, se pudieran adelgazar los arcos y lograr así una estructura que se acercase más al estado ideal de una membrana trabajando a compresión.

En los últimos cinco años, la Mecánica de las Rocas ha merecido la atención de los técnicos de todos los

(\*) En clave deberían tener en ambas ramas el mismo radio de curvatura, pues la vista denuncia desagradablemente los cambios bruscos de aquella.

(\*\*) En este sentido, hizo mucho daño la teoría de Jorgensen proponiendo el ángulo  $133^{\circ}35'$  como el más económico.

países, interesándose por la investigación y sistematización de los problemas impuestos por la cimentación de las presas.

Las investigaciones de esta nueva técnica se han dirigido, principalmente, a determinar las constantes y características del terreno que puedan permitir al proyectista la determinación de los esfuerzos a lo largo del perímetro de contacto hormigón-roca, y como consecuencia, la seguridad al deslizamiento de un bloque de roca que, con su peso y cohesión, soporta el empuje hidrostático y el peso de la bóveda transmitido a él. El otro problema fundamental es la determinación de la capacidad de carga de la cimentación.

A este efecto, se tiende a determinar — por procedimientos mecánicos y geofísicos —:

- El coeficiente de deformabilidad del terreno, enolubando en éste el de la elasticidad de la roca madre, incrementado en la que imponen la estratificación, diaclasas, fracturas, esquistosidad, etc.
- El ángulo de rozamiento y cohesión, de la roca y del hormigón con la roca.

Se comprende que, generalmente, no sea posible encontrar valores medios que reflejen las características del terreno, pues el valor de estas constantes no sólo variará de unas zonas a otras del terreno de cimentación, sino también, y mucho más, con la dirección de los esfuerzos, no debiendo olvidar nunca la marcada anisotropía del terreno motivada por la estratificación y diaclasas. La existencia de fallas, algunas veces rellenas de arcilla, y otros accidentes, marcan discontinuidades de gran importancia en la concepción y cálculos de la estabilidad de la presa y su terreno de cimentación.

Existen hoy programas de cálculo que tienen en cuenta las diferencias locales y las anisotropías del terreno, pero en cualquier caso, los procedimientos actuales sólo dan un orden de magnitud o valor aproximado de las constantes que lo definen mecánicamente, y para los casos importantes, habrá que buscar unas hipótesis límites que encuadren la realidad del problema considerado.

Con todo, el mejor conocimiento del terreno de cimentación, ha permitido llevar las ventajas del cierre con bóveda, a sitios con dificultades estructurales, que hace pocos años no se atrevían a afrontar. Cada vez se da más importancia a la estructuración y características del terreno de cimentación, siendo este último una de las circunstancias que mediatiza la concepción de la estructura.

En todos estos estudios puede prestar una útil aportación la información deducida de los ensayos mecánicos en modelos reducidos, en los que se refleja la heterogeneidad, anisotropía y accidentes de la roca de cimentación.

5.2. En relación con la seguridad de las presas bóveda, se ha dado en la última década toda la atención que merece a la evitación de la subpresión en el terreno de cimentación.

La acción del agua a presión a través de una diaclasa, junta de estratificación o falla, agrava en gran

cuantía las condiciones de estabilidad del macizo rocoso que sustenta la presa.

También se ha puesto en claro — en la discusión de si es la impermeabilización mediante inyecciones, o el drenaje, la técnica más eficaz para evitar este efecto — que el drenaje es el único medio efectivo de aminorar y evitar la subpresión, quedando la utilización de las inyecciones para aminorar la permeabilidad del terreno. Así, pues, el drenaje deberá siempre disponerse aguas abajo de la pantalla de impermeabilización.

5.3. Es normal efectuar — aparte de la red de impermeabilización — una red de inyecciones de cosido de la presa con el terreno. Estas inyecciones, más cortas que las de impermeabilización, se van efectuando gradualmente, con presiones crecientes, a medida que el peso de la estructura va creciendo durante su construcción, con objeto de no mover ésta ni de permitir asentamientos excesivos de la misma.

Las fallas de no mucha consideración, o zonas estrechas más fracturadas, deben puentearse mediante una potente armadura que pase algunos metros a ambos lados del accidente. Si la falla está rellena de arcilla, debe limpiarse ésta mediante inyección de agua a presión u otros medios, e inyectarla después, antes de efectuar el puentado. En fallas en que ambas caras han quedado separadas, o hay mayores razones para temer un deslizamiento, se puede arriostrar una cara contra la otra mediante un retícula de pozos y galerías que se hormigonan armando el relleno, de forma que esta red impida los movimientos relativos tangenciales y suponga un fuerte arriostramiento de una cara contra la otra para resistir los esfuerzos de compresión.

Cuando en una falla, junta de estratificación, etc., en que ha habido un movimiento relativo, se teme un nuevo deslizamiento, cabe dejar en la presa una junta abierta encima del accidente, y no cerrarla hasta que el peso de la estructura haya podido producir el desplazamiento relativo que se temía.

El pretensado del terreno, efectuado con medios muy simples, es una técnica sumamente eficaz para hacer frente a peligros de deslizamiento. Su utilización, motivando una presión normal al posible plano de deslizamiento, es del orden del 50 por 100 más barata, que lograrlo mediante una masa equivalente de hormigón. Finalmente, el pretensado tiene la ventaja de poder ejercer esta presión en cualquier dirección.

En relación con la seguridad al deslizamiento del macizo rocoso, no habrá que olvidar nunca que, en las presas más gruesas, el empuje de los arcos se desvía considerablemente más, de la tangente en arranque a los mismos, hacia afuera. (Se comprende en seguida que sea así, recordando la forma de trabajo descrita en el apartado 1.2, pues las fuerzas  $\Delta X$  para restablecer los apoyos a su situación primitiva crecen, prácticamente, inversamente proporcional con el m.d.i. de los pesos elásticos del arco respecto a la recta que sustenta  $\Delta X$ .)

Es norma general el disponer los arranques de los arcos, es decir, el fondo de las excavaciones, sensiblemente radiales. No obstante, en las presas gruesas, es



permisible — con objeto de ahorrarse cierto volumen de excavación y hormigón — el prescindir de la parte del extradós de apoyos, es decir, de la parte traccionada o muy poco comprimida, limitando el arco, en esta zona, a su parte activa.

## 6. DISPOSITIVOS PARA EVITAR LAS TRACCIONES

Examinamos, a continuación, los dispositivos que, al evitar las tracciones en las ménsulas, han permitido cerrar con estructura bóveda, valles con tan alta relación anchura/altura — unida, a veces, a una gran anchura en el fondo — que hasta hace pocos años se consideraba imposible concebir. También estos dispositivos especiales, han permitido lograr una repartición de las reacciones que, a lo largo del contacto presa-roca, contrarrestan el empuje hidrostático, más de acuerdo con las peculiaridades del terreno.

6.1. La junta total, a lo largo de todo el zócalo o "pulvino" evita, en parte, las tracciones, pero tiene el inconveniente de mermar la hiperestaticidad de la unión presa-terreno.

En casos como los acabados de citar, de valles de gran anchura, parece como solución muy conveniente el proyectar una junta en la base de las ménsulas centrales, de forma que las ménsulas puedan efectuar los corrimientos que piden los arcos. Esta junta no suele interesar la totalidad del espesor de la ménsula (fig. 6.1).

Para evitar subpresiones — que aumentarían las tracciones del pie de aguas arriba — se dispone siempre en este paramento un *water-stop*. Asimismo, se deberá armar con parrillas de considerable cuantía las caras superior e inferior próximas a la junta, la cual terminará en

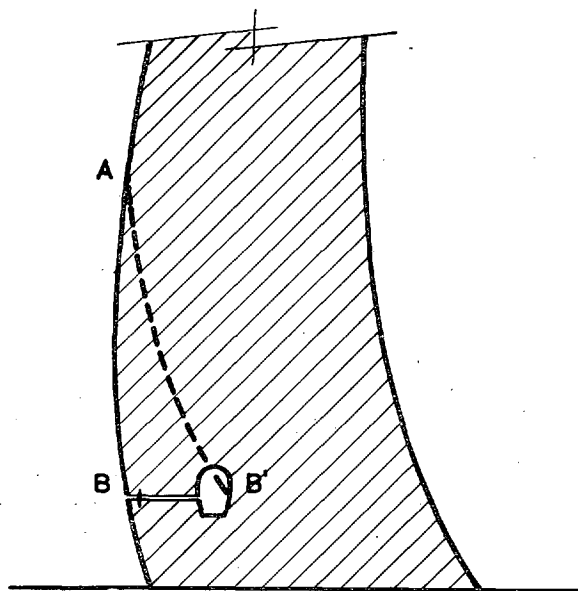


Figura 6.1.

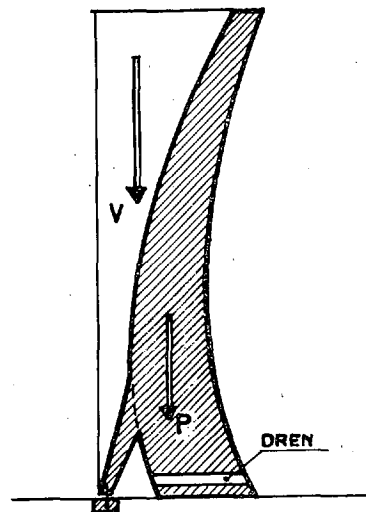


Figura 6.2.

una galería también fuertemente armada. Sirve esta última para controlar el comportamiento de la junta y evitar toda eventualidad de prolongarse la misma más allá de lo proyectado.

Respecto al tratamiento a dar a la junta, se comparan dos teorías:

a) Dejarla como junta libre, tomando todas las precauciones para que funcione como tal.

b) Tratarla como una junta de hormigonado normal, con la impermeabilización — aguas arriba — y con las armaduras acabadas de citar, de forma que la ménsula pueda trabajar a tracción en el plano de la junta, habiendo dispuesto ya, preconcebidamente, este plano de rotura con limitación de la misma, en el caso de que las tracciones reales experimentadas por la ménsula, fuesen superiores a las de rotura del hormigón.

En la hipótesis a), al efectuar el cálculo tensional, las ménsulas se comportarán como limitadas aguas arriba, por una línea tal como la  $AB'$ . En el caso b) habrá que considerar las hipótesis límites de que el paramento de aguas arriba de la presa sea el  $AB$  o el  $AB'$ , teniendo la seguridad de que el comportamiento real será uno comprendido entre estos dos extremos. En cualquier caso, para la fijación del punto A, se harán varias hipótesis tomando la más desfavorable.

Este sencillo dispositivo ha permitido aumentar de manera insospechada el campo de aplicación de las bóvedas, llegando hasta cuerdas mayores que ocho veces la altura del valle, y esto con formas tendiendo a la cerrada en U que, como ya hemos visto, incrementaba considerablemente las dificultades de cierre.

Por otra parte, esta junta tiene también aplicación cuando, por las características geológicas del valle, siendo éste relativamente ancho, o ancho y en forma de U,

interesa canalizar el empuje hidrostático hacia las laderas, dejando el fondo del valle mucho más aliviado.

En este sentido puede proyectarse la junta  $BB'$ , de forma que interese toda la ménsula, a fin de que éstas no puedan transmitir flexiones ni casi esfuerzos tangenciales al cimientó, y soportando éste poco más que el peso de las ménsulas.

En casos de valles ultraanchos, se podrían disponer dos juntas (no tratadas) tales como la  $BB'$ , y separadas una distancia del orden del espesor de la ménsula de la zona. Este dispositivo permitirá a las ménsulas seguir, sin experimentar flexiones de consideración, los fuertes desplazamientos impuestos por los arcos de gran luz.

Para poder barrer valles de gran anchura, se pueden añadir a las ménsulas que resultarían más traccionadas, un saliente en ménsula sobre el que gravite el peso  $V$  de aguas, produciendo una fortísima compresión — para embalse lleno — sobre el pie del paramento de aguas

6.3. En presas pequeñas experimentales, de gran cuerda en relación con su altura, y construidas sin ninguno de los dispositivos descritos, no han aparecido fisuras detectables a pesar de las enormes tracciones que arrojaba el cálculo tensional. Una explicación puede ser que la deformación (decompresión) del terreno, a través de sus juntas, estratificación, exfoliación o diaclasas, han permitido los giros necesarios para que las ménsulas no se agrieten.

6.4. Cuando no se quiere recurrir a estos dispositivos, o cuando la relación cuerda/altura no es exagerada, puede solucionarse el problema dando, como ya hemos dicho, un fuerte desplome a la parte baja del paramento de aguas arriba. Si esto no es compatible con las tracciones que aparecen en vacío, en el pie de aguas abajo, de las mismas ménsulas, se pueden evitar éstas mediante unos apoyos — continuo o discontinuo — dispuestos para que funcione a embalse vacío.

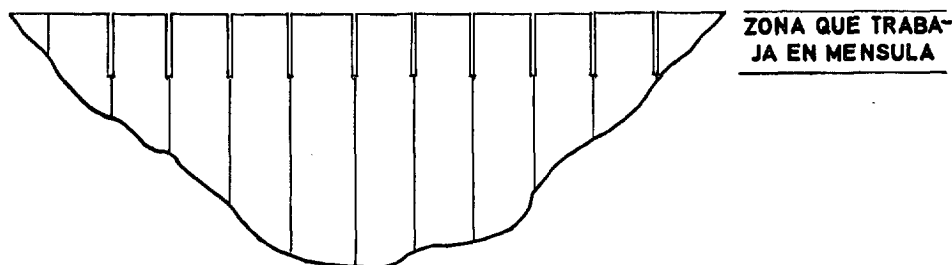


Figura 6.3.

que, unidas a las que produzca el peso propio, puede contrarrestar las grandes tracciones motivadas por el empuje horizontal. El espacio entre el añadido en ménsula y la ménsula propiamente dicha, se impermeabiliza mediante un *water-stop*. En cualquier caso, las posibles filtraciones se evacuan por drenes abiertos a través de las ménsulas (fig. 6.2).

Esta fuerza  $V$  también contribuye a incrementar en gran cuantía.

6.2. Hay veces que — por razones geológicas — interesa aliviar las laderas de los empujes transmitidos por los arcos, recargando más el fondo del valle.

Con este fin, se deja abierta cierta longitud de las juntas de contracción, tomando precauciones mediante armaduras, para que éstas no se abran más en profundidad (fig. 6.3).

En este caso, la parte superior de la estructura trabajará en ménsula, transmitiendo todo el empuje de esta zona y el correspondiente momento flector a la parte inferior de las ménsulas. Este dispositivo tiene su mayor aplicación cuando el terreno que forma en el valle, a partir de cierta altura, es inadecuado para soportar las acciones que le transmitirían los arcos.

Una ancha calzada que pase por coronación, también puede utilizarse como arco de más inercia, donde se apoyen las cabezas de las ménsulas, aminorándose así las tracciones de su pie de aguas arriba. En este caso habrá que desplomar lo necesario, hacia aguas abajo, la mitad superior de las ménsulas, para que, a embalse lleno, no se traccionen por el paramento de aguas abajo.

## 7. ALIVIADEROS Y ORGANOS DE DESAGÜE

7.1. En la génesis de las presas bóveda, la ubicación del aliviadero implicaba una desventaja para este tipo de presas, en relación con las de gravedad; haciendo, en ciertos casos, inclinarse por esta solución de cierre, cuando el caudal a evacuar era importante.

Sucedía así porque sólo se utilizaban los aliviaderos laterales en canal, en torre o en túnel; con difícil ubicación, a veces, el primero, y siempre caros los dos últimos.

Hoy en día ha desaparecido esta desventaja. Casi todas las cerradas permiten verter por coronación, con compuertas, o labio fijo, los caudales de avenidas, con

la precaución, algunas veces, de hacer una protección de hormigón armado anclado a la roca, o de crear un cuenco amortiguador de agua, o ambas cosas a la vez.

Desplomando hacia aguas abajo la presa y protegiendo algo las laderas, se puede utilizar todo el desarrollo del arco superior como labio fijo de la lámina vertiente.

El aliviadero compuesto por unas ventanas — cerradas por compuertas — situadas a una pequeña profundidad con relación al máximo embalse normal, tiene las siguientes ventajas:

- Con profundidades no inferiores a unos 10 m. se consiguen velocidades de desagüe de 15 m./seg., o superiores, que aminoran la superficie necesaria de compuertas.
- El chorro cae muy alejado de la fundación de la presa.
- En poco tiempo se puede bajar el nivel del embalse hasta reducir en gran cuantía las tensiones en la presa (téngase en cuenta que las tensiones varían como las alturas de agua elevadas a una potencia comprendida entre 2 y 3) y mantenerlo así durante el tiempo que se quiera por esta u otra necesidad.

Por contra tienen el inconveniente de que si viene una avenida mayor de la prevista, una sobreelevación del nivel del embalse no supone prácticamente ningún aumento de la capacidad de desagüe, que no hay posibilidad de superar.

Los huecos de las compuertas de superficie no rompen — si así se desea — la continuidad de los arcos de coronación, que puede hacerse siempre por medio del paso superior. En caso de aliviaderos de labio fijo, de gran desarrollo, sin paso por coronación, debe considerarse que, para verter las avenidas, las partes laterales de la presa por encima del aliviadero trabajan en voladizo.

7.2. Los desagües de fondo o aligeramiento, pueden siempre hacerse a través de una presa bóveda, con gran simplicidad.

Los ensayos en modelo reducido, han demostrado que eran infundados los temores que existían para atravesar la estructura con la tubería de algún desagüe, aunque su diámetro sea considerablemente grande.

En presas muy delgadas, la cámara de válvulas de aguas abajo puede ser un añadido a la estructura. El cierre de aguas arriba es sencillo y económico proyectarlo mediante compuertas deslizantes, accionadas desde una caseta ubicada en el paramento de aguas arriba de la coronación.

Por esta simplicidad, se puede decir — a no ser que exista alguna razón especial que abogue por lo contrario — que no es aconsejable ni económico el utilizar las galerías efectuadas para realizar la desviación provisional del río, para ubicar los órganos de desagüe de fondo o aligeramiento.

7.3. Finalmente, digamos aquí que la pequeña longitud de río ocupada por la cimentación de la bóveda, permite en muchos casos el prescindir de la galería de desviación, sustituyéndola por un sistema más sencillo, y en cualquier caso la conducción de desviación será mucho más corta que en las presas de gravedad.

## 8. LÓS LÍMITES DE ADAPTACIÓN DE LA PRESA BÓVEDA. SUS VENTAJAS

8.1. La mala calidad del terreno de fundación, y principalmente su poca resistencia para soportar ciertos esfuerzos de compresión sin llegar a la rotura o a deformaciones inadmisibles, es, quizá, la circunstancia que más limite la utilización de la bóveda para el cierre de un valle.

Una cerrada muy divergente hacia aguas abajo, también presenta serias dificultades que pueden llegar a ser insuperables.

La asimetría de la cerrada ya hemos visto (4) que, prácticamente, jamás será un problema que nos haga abandonar el proyectar una bóveda.

Con los dispositivos descritos, se llegan a poder cerrar valles, con relación cuerda/altura que llega hasta diez. La anchura del fondo también se puede soslayar con estos dispositivos y formas adecuadas.

El aliviadero es raramente un escollo que impida o menoscabe las ventajas de un proyecto de presa bóveda. Menos aún el tener que proyectar, a su través, desagües de gran diámetro.

De todos los tipos de presa, la bóveda es la más idónea para cerrar valles de gran altura. Así, pues, nunca será la magnitud de esta dimensión la que determine la exclusión de la estructura bóveda.

No obstante, nunca habrá que olvidar que, para dos cerradas geoméricamente semejantes, con iguales estructura geológica y constantes mecánicas de la roca y del hormigón, siendo también semejantes las presas, las tensiones en puntos homólogos están en la misma relación que la de semejanza, ya que la fórmula que da la tensión

en un arco o ménsula es  $\sigma = \frac{N}{e} \pm 6 \frac{M}{e^2}$ ;  $N$ ,  $M$  y  $e$

son, respectivamente, proporcionales a  $h^2$ ,  $h^3$  y  $h$ , siendo  $h$  la profundidad del punto.

8.2. Terminamos resumiendo, a continuación, las ventajas que presentan las presas bóveda, en relación con los otros tipos de presas de fábrica:

- Su forma de trabajo hace incorporar el peso de los macizos rocosos de las laderas, para impedir el deslizamiento.
- Su alto grado de hiperestaticidad — varias veces ya citado — hace que, ante la eventualidad de que falle una parte de la cimentación, se organice ésta de forma que el resto se sobrecargue, hasta que las reacciones, a lo largo de la parte activa, contrarresten el empuje hidrostático. Los ensayos en modelo reducido han demostrado que puede fallar del orden del 60 por 100 de la fundación intermedia de una ladera, o fondo, sin que peligre la seguridad de la estructura si el terreno restante está compactado para resistir las nuevas reacciones.
- Su trabajo, casi exclusivamente a compresión, junto a la primera ventaja citada, motiva un gran ahorro de

volumen de hormigón, que suele oscilar entre el 30 y el 70 por 100 de la gravedad equivalente.

- Por su forma de trabajo es autoclave.
- La subpresión no influye casi en la seguridad de lo que es la presa (pero sí de la fundación).
- Una eventual elevación del nivel del máximo embalse

extraordinario, no disminuye prácticamente la seguridad de la presa.

- Es la estructura que más posibilidades, sencillez y economía ofrece para el proyecto del aliviadero y desagüe.
- Se simplifican, y como consecuencia se abaratan, las obras de desviación del río.