

Diseño de presas bóveda en cerradas anchas

Por RAFAEL LOPEZ GONZALEZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Confederación Hidrográfica del Duero

1. INTRODUCCION

Tratamos en este artículo sobre el proyecto de estructuras en cerradas anchas o muy anchas, en las que una bóveda es su elemento principal del cierre, y donde las relaciones:

$$\frac{\text{cuerda de la bóveda}}{\text{altura de la presa sobre el zócalo}} = \frac{c}{h} \quad (\text{a})^*$$

$$\frac{\text{Long. desar. bóveda en coronación}}{\text{altura de la presa sobre el zócalo}} = \frac{d}{h} \quad (\text{b})^*$$

$$K = \frac{b + H(\sec \psi_1 + \sec \psi_2)}{H} = \frac{\text{Perímetro}}{H} \quad (\text{c})^*$$

son elevadas (para tener un orden de magnitud) digamos que:

$$\frac{c}{h} \geq 4 \quad \frac{d}{h} \geq 5 \quad K \geq 5,5). \quad \text{Véase fig. 1.1.}$$

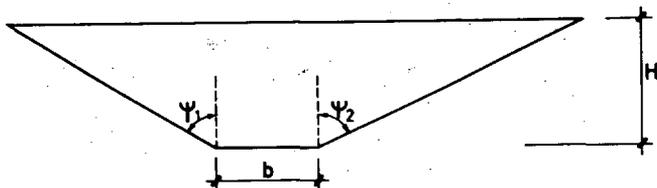


Figura 1.1.

Decimos que la bóveda es el elemento principal de la estructura, porque algunas veces, para poder desagüar la máxima avenida, es necesario disponer un aliviadero lateral, además del ubicado en coronación de la presa que, indudablemente, contribuye —en mayor o menor cuantía— a efectuar el cierre, que algunas veces se completa mediante un pequeño dique.

(*) Las letras minúsculas c, d, h, p, se refieren a las características de la bóveda, midiendo h, desde el fondo del zócalo, hasta coronación. Las mismas letras en mayúsculas, se refieren a las análogas características de la cerrada, midiéndose H desde el fondo del cauce hasta la horizontal de coronación.

2. PARAMETROS DE QUE DISPONE EL PROYECTISTA Y FORMA DE MANEJARLOS

2.1. Una de las labores del proyectista

Elegida una cerrada, con una determinada forma, geología, etc., y establecidos los caudales de máxima avenida a desagüar, caudal de los desagües profundos, existencia o no de una central de pie de presa etc.; una de las labores más importantes del proyectista —que bastantes veces es la principal— reside en la elección del tipo de presa, y en la concepción y encaje conjunto, de todos los elementos (presa, aliviaderos, desagües, etc.). Si este diseño conjunto es acertado, resultará, una obra que nos causará una impresión agradable, reflejo de una disposición racional, segura y normalmente, económica. Las disposiciones mal encajadas, motivan, en cambio, una respuesta de rechazo.

Decimos esto, porque algunas veces, es el desagüe de la máxima avenida quien condicionará, fundamentalmente el diseño (caso de Aldeadávila, situada sobre el tramo último español del río Duero, y citamos como ejemplo de obra agraciada); en otras, por ejemplo la necesidad hidráulica de un aliviadero lateral, puede compaginarse con la de absorber los empujes de los arcos superiores, que puedan quedar, por una margen, sin anclar en el terreno, al ser esta ladera más baja.

En lo que sigue de este apartado, suponemos que, la concepción y encaje de conjunto de todos los elementos que forman la estructura de cierre, y obras anejas, está ya establecido, ocupándonos sólo del diseño de la bóveda, cuya cerrada, a cubrir con ella, es ancha.

Para ver cualitativamente la forma de trabajar la bóveda, es de todos conocida la abstrac-

ción de suponer idealmente dividida la presa, por una serie de planos horizontales y otra de planos (más bien 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 el arco que se cruzan en él, de forma que los desplazamientos y giros sean iguales para ambos.

De este párrafo se desprende que, podemos decir que la bóveda resiste el empuje hidrostático mediante un «trabajo en arco» complementado por otro «trabajo en ménsula». El logro perseguido normalmente en toda presa bóveda, de acentuar su trabajo en arco, disminuyendo lo posible el de las ménsulas, se debe cuidar mucho más, en cerradas anchas por la dificultad que plantean, para este logro, las elevadas relaciones, (a), (b) y (c) que figuran en el apartado 1.

Existen actualmente programas de ordenador que, dando las tensiones de tracción y compresión máximas admisibles, suministran un diseño de cubo de hormigón mínimo.

Sin restar ningún valor a este herramienta, opinamos que, es un valioso auxiliar que se debe complementar con un diseño logrado por los métodos convencionales, prestándose mutua ayuda, pero que en pocos casos puede utilizarse por sí sólo. Pensamos así porque:

- El mínimo de hormigón que da, difiere en un porcentaje muy pequeño, del que arroja un encaje y diseño hecho por los métodos tradicionales.
- Estos programas no suelen contemplar la favorable incidencia de los arcos en relación con la topografía, sistemas de diclasas, planos de estratificación, influencia de accidentes notables, etc.; facetas éstas de la mayor importancia, para la seguridad de la obra.

2.2. Los parámetros y dispositivos que puede manejar el proyectista.

Los parámetros y dispositivos que puede manejar el proyectista, para un acertado ajuste de la bóveda, en la cerrada dada, y en general, lograr un buen diseño de aquella son:

1) Forma de las ménsulas y, en especial, de las más alta.

2) Variación de curvatura de los arcos, a cada altura

$$R(s, z) = \frac{1}{\tau(s, z)}$$

siendo s y z el desarrollo del arco, a partir del origen, y su profundidad, respectivamente, R y τ el radio de la curvatura, y curvatura.

3) Variación de espesores de estos arcos, (secciones horizontales de la bóveda).

4) Elección de los ángulos centrales de los arcos.

5) Proyectar estribos en la parte superior de la bóveda.

6) El establecer que todas las rectas que contienen las secciones normales, en clave de cada arco, estén en un mismo plano vertical, o formen una superficie alabeada, reglada de plano director horizontal. (Caso de la Presa de Los Angeles de San Rafael).

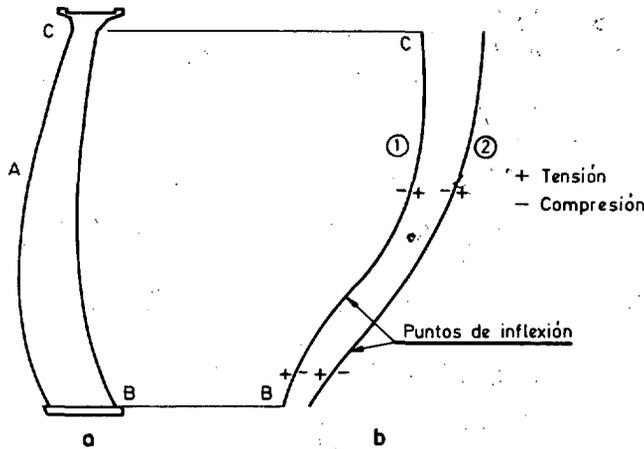
Naturalmente todos estos parámetros, no son independientes entre sí, sino que tienen varias interdependencias, de forma que al variar uno de ellos, repercute en todos los demás.

Además cabe disponer una junta parcial en base, en las ménsulas de la parte central de la bóveda, para acentuar el trabajo en arco y disminuir el trabajo en ménsula.

2.3. Forma de las ménsulas

Es bien conocido, que las secciones verticales, o ménsulas, de la superficie media deformada de una bóveda sometida a su propio peso y presión hidrostática tienen el aire de la fig. 2.1., dependiendo la localización del punto de inflexión, y las curvaturas resultantes, de las condiciones de empotramiento en su base (rigidez de la roca de fundación) y del apoyo más o menos flexible que realiza en los arcos superiores (rigidez de la coronación), resultando compresiones y tracciones (en general notoriamente más fuertes las primeras que las segundas) en las zonas y paramentos que se indican en dicha figura.

Puede verse, quizá, más intuitivamente esta



La deformada (2) corresponde a un terreno y a un arco de coronación menos rígido que el de la deformada (1)

Figura 2.1.

forma de trabajar la presa, a través de sus ménsulas, observando que la forma de repartición de presiones entre arcos y ménsulas, tiene el aire que indica la figura 2.2.a) a la que corresponde la ley de momentos flectores de la fig. 2.2.c), que tracciona la parte de los paramentos de la ménsula, que se indica con la línea de trazos en la fig. 2.2.b) Con objeto de contrarrestar estas tracciones, sabido es que se da a las ménsulas una curvatura, de forma que el peso propio motive una ley de momentos flectores, lo más parecida posible, en valor absoluto, y de signos opuestos, a la producida por el empuje hidrostático (fig. 2.2.c.)

En el caso de cerradas anchas, la zona aa'c, de momentos favorables, tiende a decrecer, aumentando en cambio el área bocc' (ver fig. 2.2). Para paliar las fuertes tracciones producidas —por esta tendencia— en A principalmente, y en B, en menor cuantía, deben proyectarse ménsulas de «curvatura muy acusada» compatible, con que las tracciones que aparecen a embalse vacío, en el pie de aguas abajo, y hacia el tercio superior del paramento de aguas arriba, sean admisibles. También deben de engrosarse los arcos superiores, para constituir un apoyo más rígido de las ménsulas (ver fig. 2.1), y no engrosar éstas excesivamente en su base, ver fig. 2.8, de forma a darles mayor flexibilidad, para disminuir —por ambas medidas— en todo lo posible, el empuje hidrostático que toman, para que sus deformaciones sean iguales a la de los arcos, de gran luz, por la anchura de la cerrada. En definitiva, por lo que a espesores se refiere, deben distribuirse éstos, de forma que, no exista gran diferencia entre el espesor en coronación y en la base, debiendo darse el espesor máximo, hacia un tercio de su altura, contando desde dicha base; o que en este tercio inferior, el espesor se mantenga sensiblemente constante.

El evitar, o al menos paliar en lo posible, las tracciones, a embalse vacío —antes citadas— en la base (aguas abajo), de las ménsulas centrales, puede conseguirse disponiendo unos

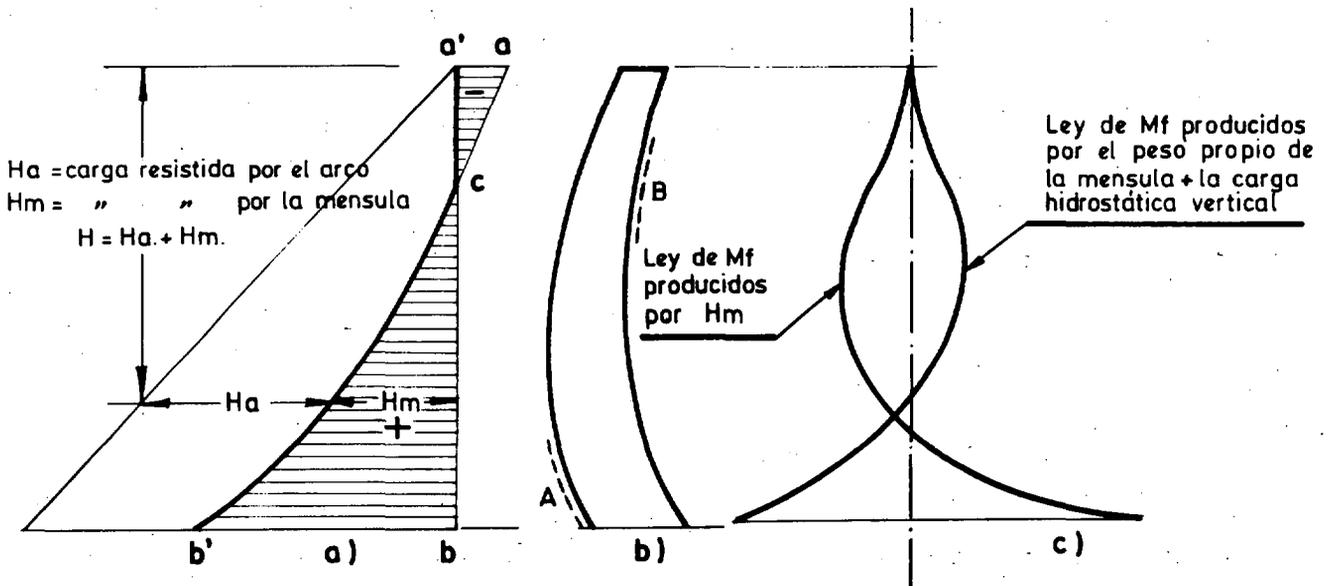


Figura 2.2.

apoyos o «muletillas» donde descansen las ménsulas, a embalse vacío, como en el caso de Valdecañas (España). La otras tracciones, también citadas, que se dan a embalse vacío, en el tercio superior del paramento de aguas arriba, suelen ser menos acusadas y peligrosas, sobre todo si se lleva un orden de hormigonado de bloques, de forma que no existan grandes desfases entre dos contiguos. Finalmente digamos aquí, que la supresión de las tracciones que se dan en el pie de agua arriba y aguas abajo, para embalse lleno y vacío, respectivamente, se puede conseguir, para cerradas muy anchas, disponiendo una junta parcial en la base de las ménsulas, tema que trataremos después. En el caso de disponer esta junta, o en valles en U, especialmente, la curvatura de las ménsulas debe ser menor.

2.4. Variación de curvatura de los arcos

En una presa bóveda, en que los arcos, como es normal aumentan su espesor, al acercarse a arranques, la carga tomada por éstos tienen un aire como el que indica la figura 2.3.a), disminuyendo esta presión de clave a arranques.

Siendo la ecuación intrínseca del arco anti-funicular de estas cargas normales:

$$p(s).R(s) = N = Cte.$$

(Como se deduce de forma inmediata en la figura 2.3b), al radio de curvatura debe ir aumentando de clave a arranques. Esta variación se acentúa más en los arcos superiores, y con la anchura de la cerrada. En los cierres anchos, debemos pues proyectar los arcos, con curvatura variable, decreciente de clave a arranques, con una relación

$$\frac{R \text{ arranques}}{R \text{ clave}}$$

que suelen ser mayor que dos en los arcos superiores, disminuyendo esta relación — para un valle en V, o trapecial no ancho en el fondo — a medida que los arcos disminuyen de cota. En valles en U, estas variaciones, pueden descender mucho o incluso anularse.

En las cerradas, anchas y en V, con laderas rectas o cóncavas, no suele interesar disminuir el gradiente de variación de curvatura de los arcos, a medida que descendemos de coronación al fondo del valle; contrariamente, en las cerra-

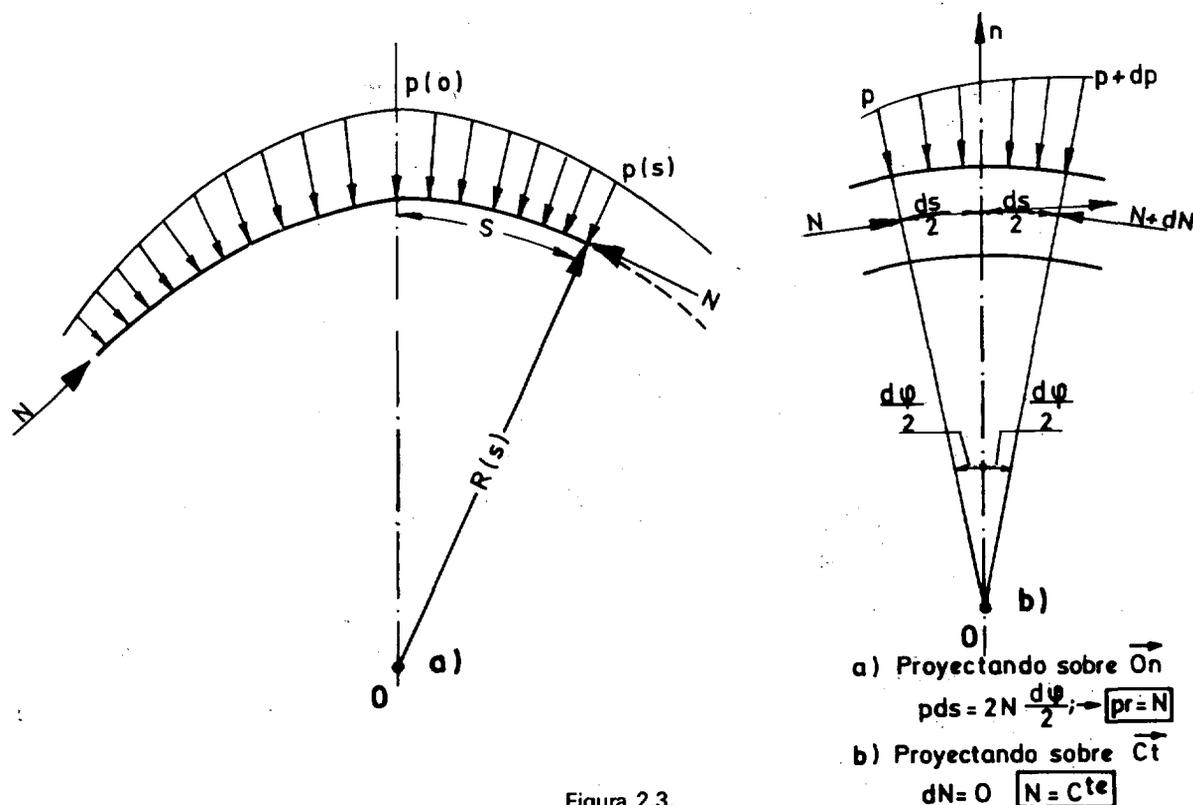


Figura 2.3.

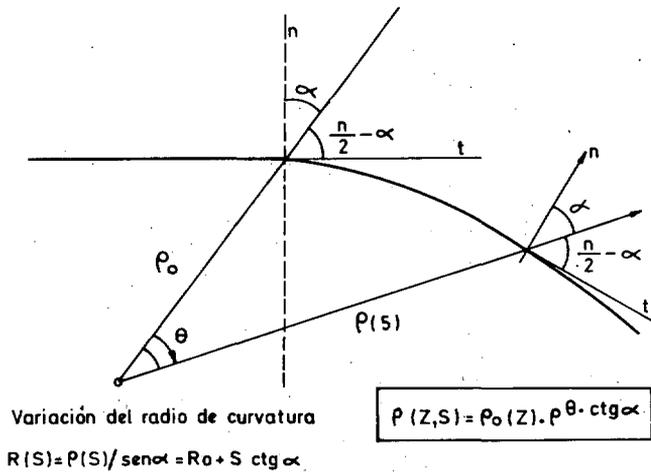


Figura 2.4.

das anchas en V, con laderas convexas, debe irse disminuyendo este gradiente con la profundidad de los arcos.

Así por ejemplo, si utilizamos como directrices de los arcos espirales logarítmicas, como se ilustra en la fig. 2.4.; debe ir disminuyendo a medida que aumenta la anchura de la cerrada, en relación con su altura. Así mismo, para laderas cóncavas se mantiene constante con la

altura, pudiendo ser aconsejable aumentar con la profundidad para laderas rectas; y, con seguridad, en cerradas con laderas convexas con aires parecidos a como se indica en la fig. 2.5.

Al acercarse, mediante una forma acertada de los arcos, al antifunicular de las cargas normales que soporta, no sólo redonda en una mejora tensional del arco, al trabajar éste más a compresión, sino que también implica una notoria 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 aquellas motivadas, principalmente por el trabajo de flexión. Esta disminución del corrimiento de las ménsulas, aminora las tracciones en las mismas, al disminuir en ellas los momentos flectores.

Como arcos de radio de curvatura creciente de clave a arranque se suelen utilizar:

- Parábolas.
- Espirales logarítmicas.
- Arcos compuestos por varios tramos circulares.
- Elipses (con clave, en un extremo del eje mayor).

FORMA DE LA CERRADA

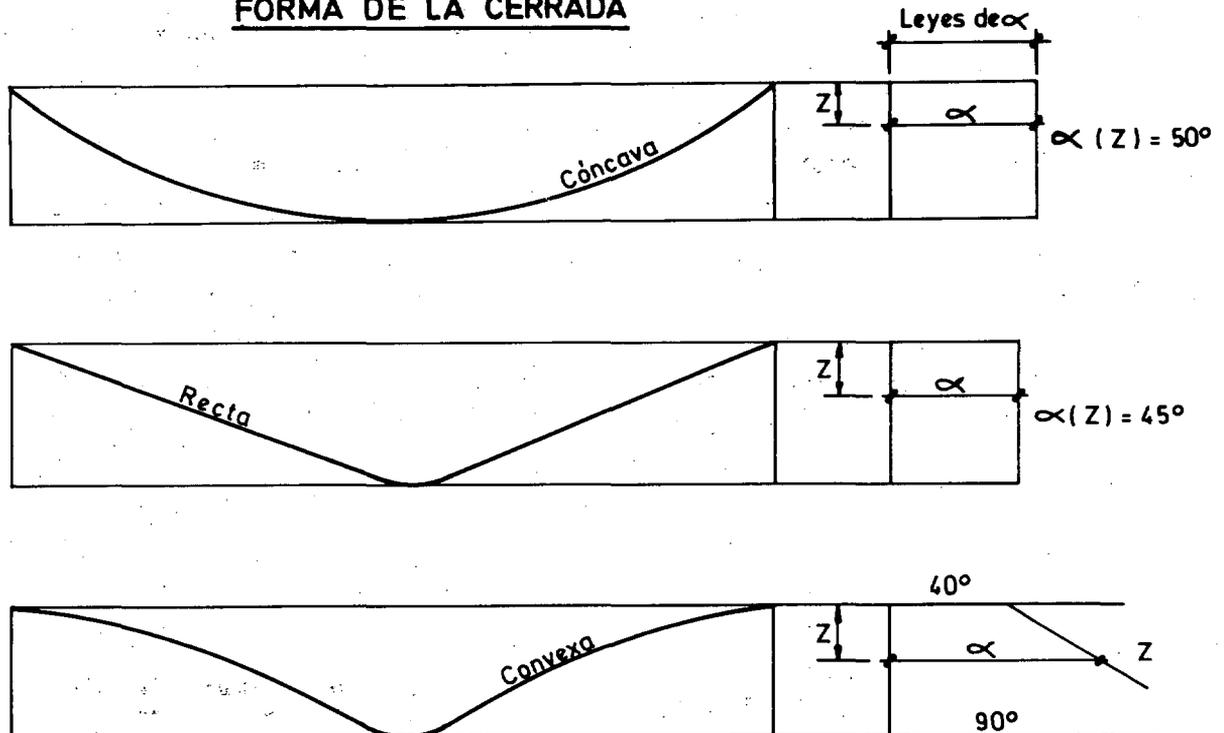


Figura 2.5.

Todas ellas se adaptan bien a su función, y su utilización depende más del gusto del proyectista y del hábito del país, que de su eficacia.

2.5. Variación de los espesores de los arcos

En nuestra opinión, para cerradas anchas deben utilizarse arcos de espesor constante, o muy ligeramente variable, en la parte central de su desarrollo, engrosándose después, al acercarse a los arranques. Este aumento de espesor, que puede llegar a ser un 100 por 100 en los arcos superiores, suele disminuirse con la cota del arco, no pasando del 20 ó 30 por 100 en los arcos medios.

2.6. Angulos centrales en los arcos

Para aumentar al máximo posible el trabajo en arco de la estructura, y disminuir, en consecuencia, el trabajo en ménsula, debe irse a arcos de ángulo central máximo, compatible con una segura incidencia de los arcos en las laderas, habida cuenta de su topografía y geotécnica (orientación de los planos de estratificación, de diaclasas o exfoliación).

En la solución de compromiso que se adopte para alcanzar, ponderadamente, ambos objetivos debe prevalecer el lograr un seguro empotramiento de los arcos en las laderas, interesando grandes masas de ésta, con un amplio margen de seguridad, ya que entendemos que este condicionante, es quizá, el más importante a observar por el proyectista, en el diseño de una bóveda.

2.7. Proyectar estribos o ensanchamientos

Proyectar estribos en la parte superior de la bóveda, o grandes ensanchamientos graduales, en las zonas extremas de estos arcos.

Para aminorar la luz de los arcos superiores (especialmente en las cerradas anchas) y para poder también, a veces, aumentar los ángulos centrales de los arcos superiores, se proyectan dos estribos en sendas márgenes, de la forma que, esquemáticamente, se indica en la figura 2.6.

Otras veces se disponen estribos, cuando se

quiere encajar, una bóveda —por una o las dos márgenes— más alta que la cerrada, caso que no nos interesa ahora.

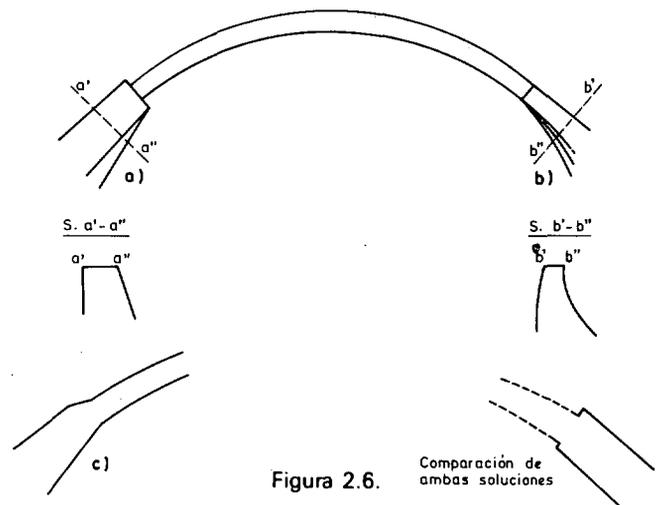


Figura 2.6. Comparación de ambas soluciones

Muchas veces, se proyectan éstos, como se ilustra en la fig. 2.6a); esto es: construyendo un muro de gran anchura, donde ancla el arco, existiendo en el engarce de éste con aquél, una fuerte discontinuidad.

Con menos frecuencia, se diseña éste, sin solución de continuidad con la bóveda (de forma que las leyes de espesores y sus primeras derivadas son funciones continuas de s , —coordenada curvilínea del arco—). La bóveda se ensancha pues, en esta zona, con secciones transversales tales como $b'b''$ (fig. 2.6b), en que su perfil es equivalente, o mayor a veces, a uno de gravedad. En definitiva —en este caso— se trata de un ensanchamiento de la bóveda en sus partes superiores extremas.

Esta segunda modalidad tiene —pensamos— las siguientes ventajas sobre la primera:

- Evita la concentración de tensiones, en el entronque de los arcos superiores con el estribo, que en el caso de que aquellos, por cualquier circunstancia, se carguen más de lo previsto, puede llegar a ser importante, hasta el punto de que los ensayos a rotura muestran la ruina de estas zonas produciéndose en la unión presa-estribo una separación entre la bóveda (lámina relativamente estrecha) y el estribo (cuerpo masivo de mucha mayor anchura).

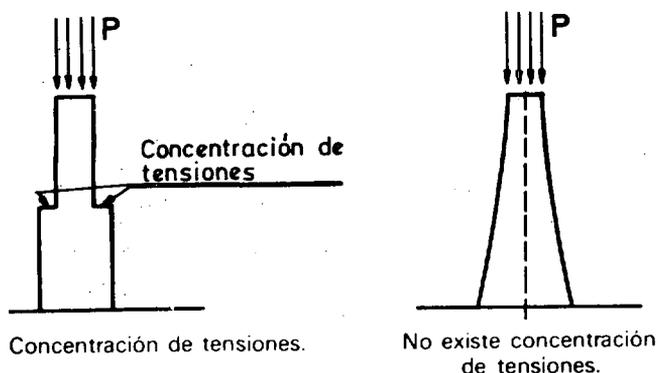


Figura 2.7

(Esta concentración de tensiones, no es si no una extensión de la que reflejan las teorías de la elasticidad, estudios plásticos, y ensayos, al comparar las dos columnas que muestra la fig. 2.8.)

- La solución constructiva, es más sencilla, ya que se encofran, sin interrupción con la bóveda, de la cual forman parte.
- El aspecto estético es más favorable.

La veracidad de los dos primeros puntos, son hechos comprobados por la experiencia y ensayos, y además por el cálculo, el primero. En cuanto a la preferencia estética, es una cuestión de gustos.

Terminamos diciendo, que si el estribo se proyectara, independiente de la bóveda, debería adoptarse soluciones del tipo de la figura 2.6c).

2.8. Importancia de un buen empotramiento de los arcos superiores.

Los ensayos mecánicos convencionales, llevados hasta la rotura nos muestran, la impor-

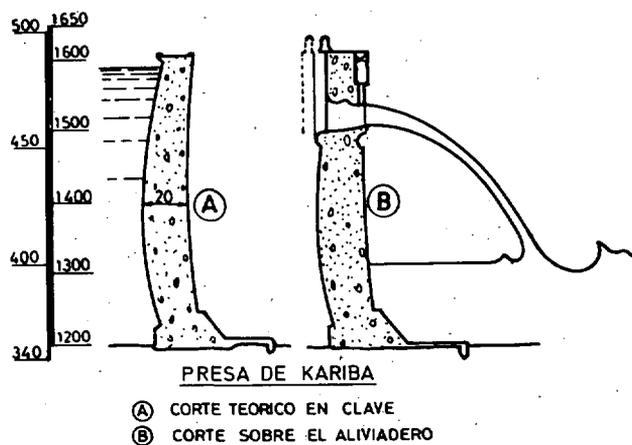


Figura 2.8.

tancia que tiene, para la estabilidad de la bóveda, el lograr un seguro empotramiento de los arcos superiores de ésta.

En estos ensayos se suele producir la rotura, dejando fijo el peso propio y aumentando, gradualmente, el empuje hidrostático, hasta motivar el colapso de la bóveda (acontece éste, cuando el empuje hidrostático es de 5 a 7 veces el real).

Sucede entonces —de acuerdo con lo expuesto al comienzo del apartado 2.3— que al acentuarse las tracciones que normalmente se dan, hacia el cuarto superior del paramento de agua abajo, se produce una grieta horizontal, hacia esta altura, que aunque no afecta el total del espesor de la bóveda cambia de forma radical, la manera de trabajar ésta: La parte inferior, al no apoyarse en la superior, acentúa su trabajo a flexión, aumentando sus desplazamientos radiales. La parte superior, al carecer ahora, de la colaboración de las ménsulas, trabaja casi exclusivamente en arco, soportando, la totalidad del empuje hidrostático, y aumentando, como consecuencia, de manera considerable, el empuje que transmite, a esta parte superior de la estribación.

Si estos estribos son lo suficientemente pesados o están los arcos bien anclados en la roca, la presa sigue resistiendo; si no, sobreviene un rápido y total hundimiento de esta zona superior.

Por ello, es para nosotros fundamental el anclaje o estribación muy segura, de la parte superior de la bóveda, no cuidada muchas veces por los proyectistas, como consecuencia de no reparar más que en el estado elástico, en el que estos empujes son pequeños en general.

2.9. Soluciones de presa bóveda para cerradas anchas y asimétricas.

En cerradas anchas y asimétricas, 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 éstos, son distintos, a cada lado del plano anterior, en cuanto a su ley de curvaturas, espesores o ambas cosas simultáneamente. En clave deberán tener en ambas alas el mismo ra-

dio de curvatura, pues la vista denuncia desagradablemente los cambios bruscos de aquéllas.

En valles con disimetría muy acusada, se puede encajar, satisfactoriamente, una bóveda transformando progresivamente a la que cubre la ladera más tendida, en una presa con perfil gravedad, y de directriz con curvatura fuertemente decreciente. Esta modalidad especialmente conveniente, cuando a la fuerte asimetría de valle, se une el que sea éste, también, ancho en coronación. Como ejemplo de esta solución se puede citar la presa de Orden en Suiza, que se incluye en la figura 2.9, de una altura de 45 m.

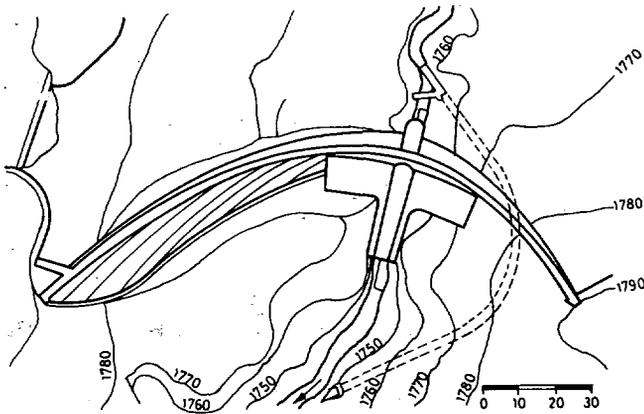


Figura 2.9.

En cerradas muy asimétricas, pero no excesivamente anchas, pensamos que se logra un diseño adecuado y satisfactorio, proyectando 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 a los arcos en clave un helicoide de plano director. Una presa de este tipo es la de los Angeles de San Rafael, cuya planta se incluye en la figura 2.10, y una vista del conjunto en la figura 2.11.

2.10. Presas bóveda — para cierres muy anchos — con junta en base.

En cerradas muy anchas, cabe hacer prevalecer el trabajo en arco, y anular — o al menos paliar en gran cuantía — las fuertes tracciones que en el pie de aguas arriba de las ménsulas centrales, se produce a embalse lleno, así co-

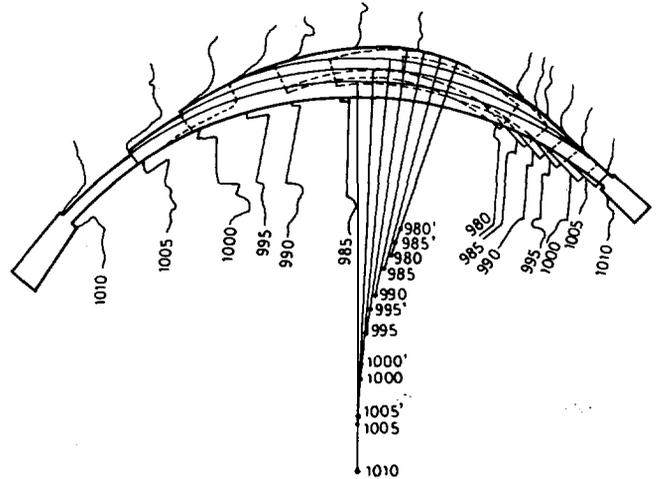


Fig. 2.10.— Presa de los Angeles de San Rafael. Definición de arcos.

mo las que en el pie de aguas abajo, pueden aparecer, para ménsulas muy curvadas, en el pie de aguas abajo, para embalse vacío.

Se puede ofrecer entonces, como solución conveniente el proyectar una junta en la base de las ménsulas centrales, de forma que éstas puedan efectuar los corrimientos que piden los arcos, tomando una carga hidráulica reducida. Esta junta, no suele interesar la totalidad del espesor de la ménsula.

Para evitar las subpresiones — que tienden a producir tracciones en el pie de aguas arriba y restar estabilidad a la obra — se dispone siempre en este paramento un «waterstop». Asimismo, se deberá armar con parrillas de considerable cuantía las caras superior e inferior próximas a la junta, la cual terminará en una galería también 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 comparten dos teorías:

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

b) Tratarla como una junta de hormigonado normal, inyectándola, 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



Fig. 2.11.—Presa de los Angeles de San Rafael. Vista desde aguas abajo.

misma, en el caso de que las tracciones reales experimentadas por la ménsula, fuesen superiores a las de roturas 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 (fig. 2.12).

Este sencillo dispositivo ha permitido aumentar de manera insospechada, el campo de apli-

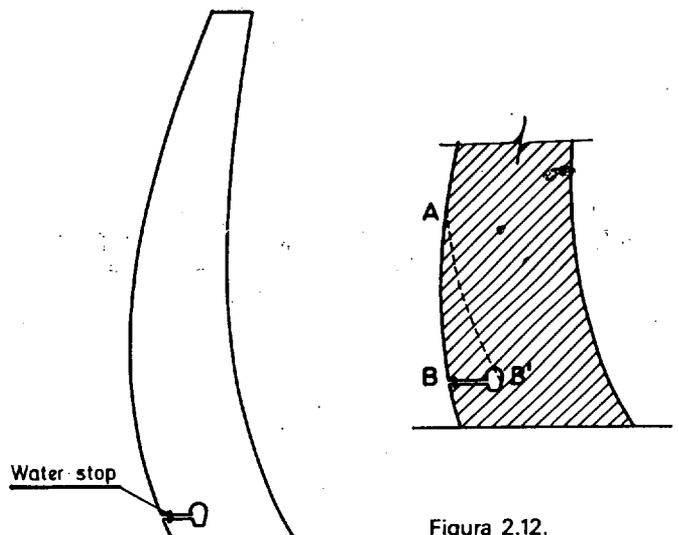


Figura 2.12.

cación de las bóvedas, llegando hasta cuerdas mayores de ocho veces la altura del valle.

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.

Como el disponer una junta de base, hace que se carguen más los arcos, especialmente los superiores, habrá que examinar con más atención la incidencia y buen empotramiento de los arcos superiores, tema que se ha tratado, en el apartado 2.8.

Como ejemplo de cerradas con junta de base, podemos citar las presas de Les Toules y Shiffenen en Suiza, y la de Louzas en Francia, existiendo sobre ellas (sobre todo sobre las primeras) abundante documentación escrita y gráfica.

3. DOS EJEMPLOS DE PRESAS BOVEDA ESPAÑOLAS, ENCAJADAS EN CERRADAS ANCHAS

Presentamos en este apartado dos ejemplos de presas bóvedas españolas de la Confederación Hidrográfica del Duero, ubicadas en cerradas anchas. Estas son:

- 1) La presa del «Castro Celta de Las Cogotas», sobre el río Adaja en la provincia de Avila.
- 2) Presa del «Pontón Alto», en el río Eresma, que se utilizará para el abastecimiento de agua potable a la ciudad e Segovia, y su entorno.

3.1. La Presa del Castro de las Cogotas

La presa del Castro de las Cogotas —en construcción avanzada— se ubica en una cerrada «moderadamente ancha» y la segunda, cuya construcción, se iniciará hacia principios de verano, se encaja en una cerrada «muy ancha».

Las relaciones (a), (b) y (c) del apartado 1, son las que siguen para ambas bóvedas.

En estos dos ejemplos, contrariamente a como procedimos en el apartado 2, suponiendo que «la concepción y encaje de conjunto de to-

Relaciones en las bóvedas

Presas	c/h	d/h	p/h
Las Cogotas	3,8	5,5	6
Pontón Alto	5,2	6,3	7

dos los elementos que forman la estructura de cierre, y obras anejas, está ya establecido, ocupándonos sólo del diseño de la bóveda, cuya cerrada, a cubrir con ella, es ancha». Nos ocuparemos en cada caso, no sólo de dicho diseño, sino también del «encaje del conjunto» antes citado.

Así mismo, al exponer las características de los proyectos de cada bóveda, remitiremos al correspondiente subapartado —del apartado 2 anterior— que no indujo a adoptarlo.

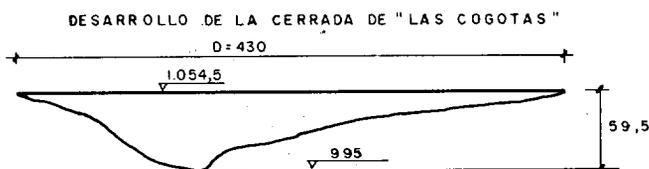


Figura 3.1.

$$\frac{C}{H} = \frac{345}{59,5} = 5,8 \quad \frac{D}{H} = \frac{430}{59,5} = 7,2$$

$$\frac{P}{H} = \frac{465}{59,5} = 7,8$$

- b) La cuenca aportadora, de 846 Km² de extensión, es baja, con las siguientes alturas:

máx.	2.200 m.
mín.	995 m.
media	1.283 m.

Cuyas aportaciones —muy irregulares— registradas en un período de 32 años son:

Aportaciones	
media	158 Hm ³
máx.	482 Hm ³
mín.	21 Hm ³

La onda de máxima avenida —de 500 años de período de recurrencia— tiene una duración de 30 horas, con una punta de 980 m³/seg. y volumen de 49 Hm³.

- c) La proximidad de la ciudad de Avila, situada 10,5 Km aguas arriba ha limitado la al-

tura de la presa a 66,5 m. sobre cimientos, habiendo impedido proyectar una presa más alta, para crear un embalse, que regulase mayor caudal.

d) La cerrada está constituida por una masa granítica, bastante meteorizada y diaclasada en superficie, pero que excepto en alguna zona localizada, aparece sana y compacta en cuanto se llega a una profundidad de unos 5 a 7 m. El terreno de cimentación sólo presenta un accidente importante: una falla situada en la margen derecha en la cota 1002, con orientación sensiblemente igual a la línea de nivel de la excavación, en esta cota, con un buzamiento de 40° a 45° y un espesor de 3 a 4 m. Después, diremos como se ha tratado este accidente.

e) La central hidroeléctrica se va a situar unos cientos de metros aguas abajo de la presa, por lo que no plantea problemas o condicionantes para el diseño de ésta.

f) Recordamos que una de las misiones del embalse es, la laminación de avenidas, y que se deben proyectar unos desagües de medio fondo, para regular el caudal de riego y controlar el nivel del embalse, principalmente durante su primer llenado.

Planteado con estos datos de partida, el problema del encaje de la presa, con todos sus órganos de desagüe anejos, y teniendo en cuenta, el gran peso, que en el diseño tiene, la forma de la cerrada resulta:

1. Debe disponerse de una longitud de aliviadero de labio fijo de unos 100 m. No es deseable tener que manejar las compuertas, para desaguar la máxima avenida, ya que la presa regula como un 40 por 100 de la aportación media, vertiendo por el aliviadero el 60 por 100 restante.

Como en coronación puede ubicarse un aliviadero de unos 55 m. de desarrollo máximo, debe disponerse un aliviadero lateral —de unos 45 m.— que además de su labor específica, es deseable que cumpla las siguientes otras funciones:

- Digamos primeramente que siendo la cerrada muy ancha y fuertemente asimétrica, el aliviadero lateral debe disponerse en

la margen izquierda, ya que ésta, con 290 m. de longitud, tiene una pendiente muy suave, sobre todo en su parte superior (del orden del 8 por 100, en la zona en que se ubica este aliviadero); mientras la izquierda, de 150 m. de longitud es bastante escarpada.

- En esta margen izquierda, los últimos 20 m. de bóveda al quedar sin apoyo en el terreno, —al ser esta ladera más baja— se anclan en el aliviadero lateral, que cumple así, además de su labor específica, la de servir de empotramiento a estos arcos, y continuar el cierre de la bóveda en una longitud de 54, completado por 100 m. de dique lateral de 18 m. de altura máxima, medidos desde el fondo de la cimentación.

Para que el aliviadero, cumpla cabalmente, su función de estribo, su masa de 60.000 T, se distribuye juiciosamente, disminuyendo la misma, a medida que nos alejamos del anclaje de los arcos que en él se empotran. Por ello, los tres no tienen igual pendiente, sino que es muy suave —con perfil convexo— y de longitud suficiente, en el primero, para que puedan empotrarse, en este primer bloque, los últimos 20 m. de bóveda, que no tiene apoyo en la ladera: el segundo canal tiene un perfil de transición y el estricto de gravedad preciso, el tercero, que a su vez se apoya en el dique, alineando en su primer tramo con la coronación del aliviadero (ver fig. 3.2). Resulta así, que el «vertedero —estribo» lateral, es como un toco paraboloidal, de plano director, siendo éste sensiblemente paralelo al eje del aliviadero.

Las dos pequeñas compuertas Taintor (de $6 \times 4,50 \text{ m}^2$), ubicadas en el centro del aliviadero lateral, no tienen que utilizarse —como hemos dicho— para evacuar la máxima avenida, teniendo como función, una casi total evitación de éstas y poder, en 36 horas, disminuir las presiones sobre la presa en un 25 por 100, así como el contenido del embalse —supuesto lleno— en un 20 por 100, para poder hacer frente, con rapidez, a un comportamiento anómalo de la bóveda.

Así pues la estructura de cierre está constituida por: una presa bóveda, seguida de un

DISEÑO DE PRESAS BOVEDA EN CERRADAS ANCHAS

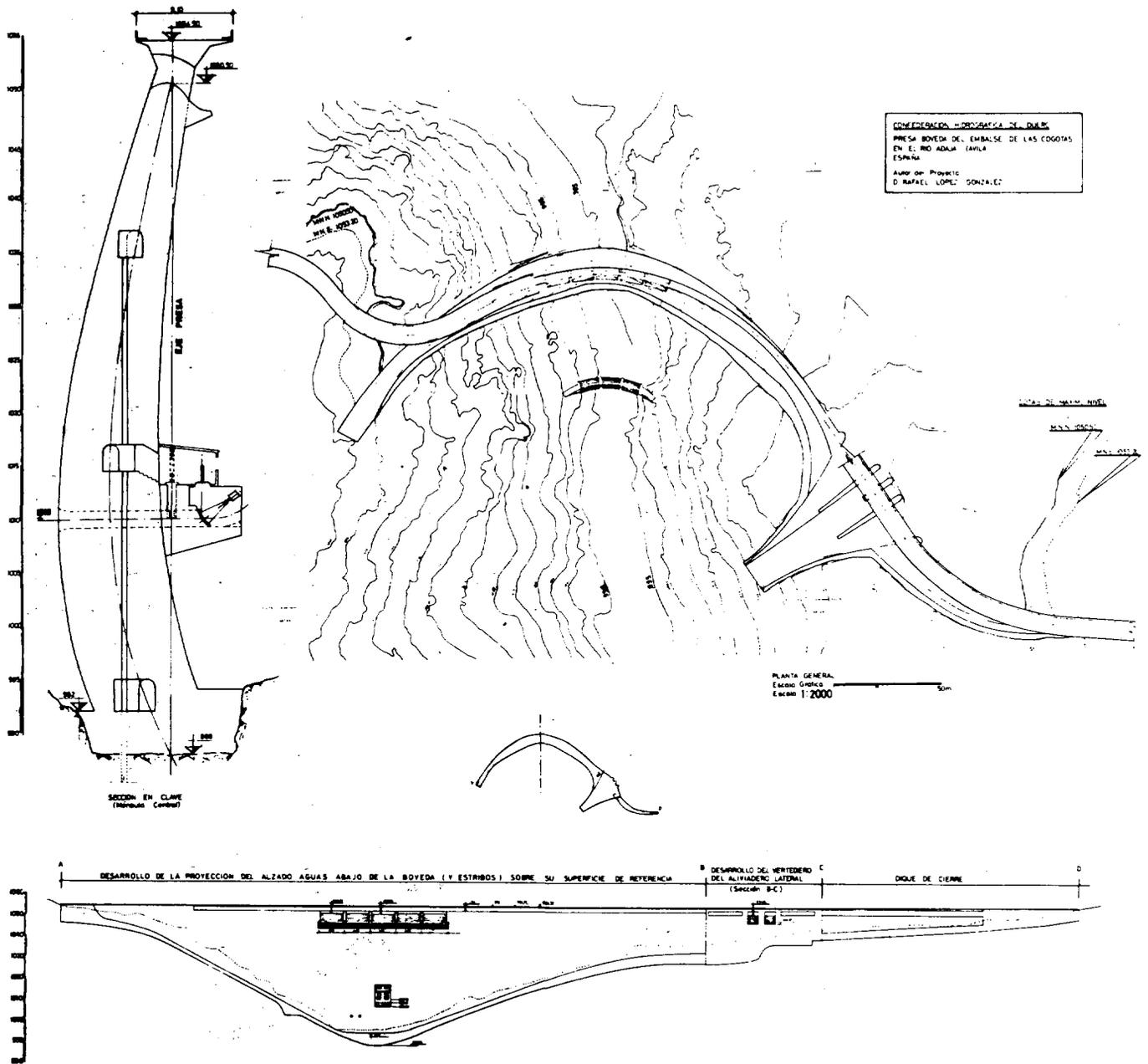


Fig. 3.2.—Presa del Castro de las Cogotas. Forma y dimensiones.

aliviadero lateral, y un dique de gravedad, que completa el cierre, tal como se ilustra en la fig. 3.2.

El diseño ha perseguido, el acercarse, lo más posible al antifunicular de la carga hidrostática + peso propio, con una favorable incidencia y seguro anclaje de los arcos, sin haber olvidado nunca una sencillez de formas constructivas: Las secciones horizontales son arcos de formas espirales logarítmicas y espe-

sor variable (casi constante en la parte central y ensanchándose, notablemente en los arranques). Esta geometría, de los arcos, se ha conjugado, con la de las ménsulas, para llegar a la superficie antifunicular citada, pero de manera, que todos los bloques (debido a la geometría y al tipo de juntas proyectadas) sean autoestables, para dar la máxima flexibilidad al plan constructivo.

La relación de espesores de arranques a cla-

DISEÑO DE PRESAS BOVEDA EN CERRADAS ANCHAS

PRESA DEL "CASTRO DE LAS COGOTAS"

ANGULO (β) DE LAS SECCIONES HORIZONTALES

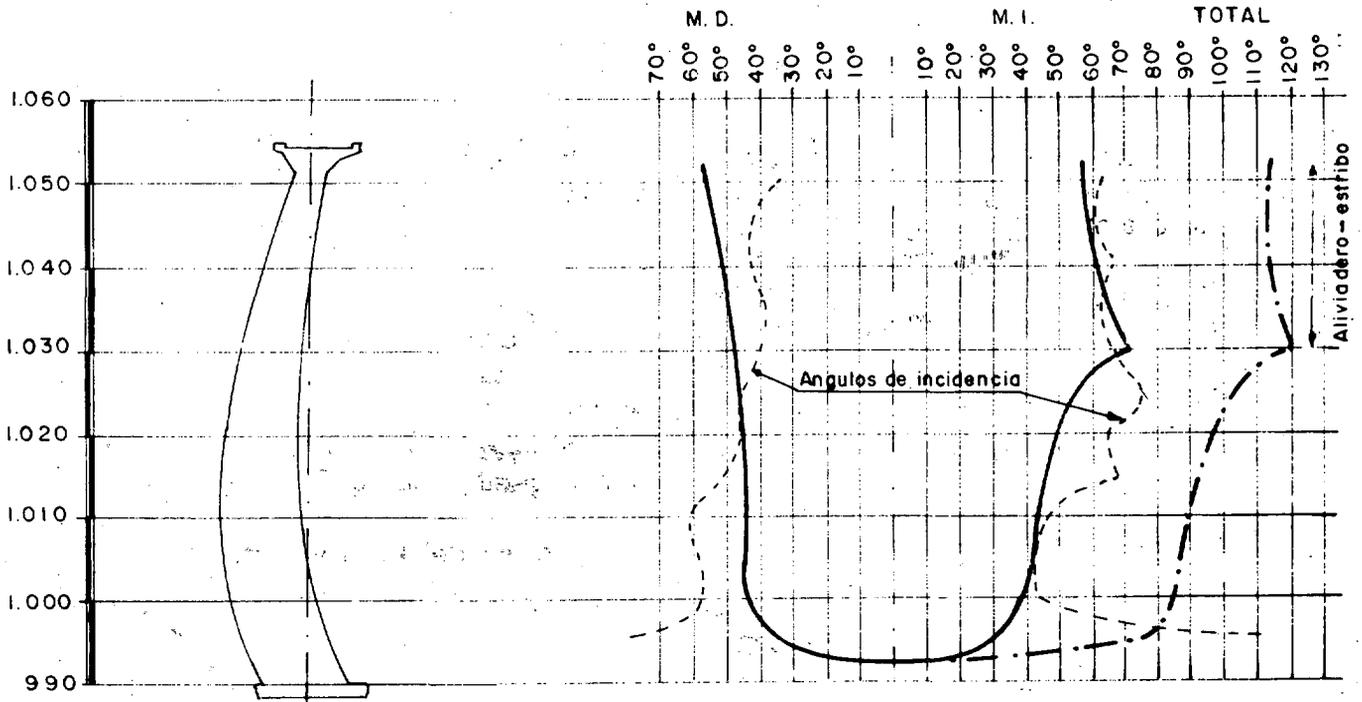


Figura 3.3.

ve, en los arcos, oscila de 2 a 1,20 aproximadamente, pudiéndose decir que 1,30 es la relación media.

El logro de haber podido conjugar, satisfactoriamente, unos grandes ángulos centrales de los arcos, (que favorezca el trabajo en arco de la bóveda) junto con una segura incidencia, de éstos en las márgenes, lo demuestran los gráficos de la figura 3.3.

Merced a lo anteriormente expuesto, se logra que los dos paramentos de la presa, estén —para la hipótesis de peso propio + máximo empuje hidrostático— a compresión, con un valor máximo de esta de 17 kg/cm², existiendo —en el paramento de aguas arriba— una zona muy pequeña traccionada, con tensiones que no pasan de 5 kg/cm².

Como decíamos, la obra se encuentra actualmente, en ejecución avanzada, llevándose puesto 103.000 m³., de hormigón de los 129.000 que cubica la totalidad de la obra de cierre, distribuidos como sigue:

Bóveda	95.500 m ³
Aliviadero lateral ...	25.000 m ³
Dique de cierre	8.500 m ³

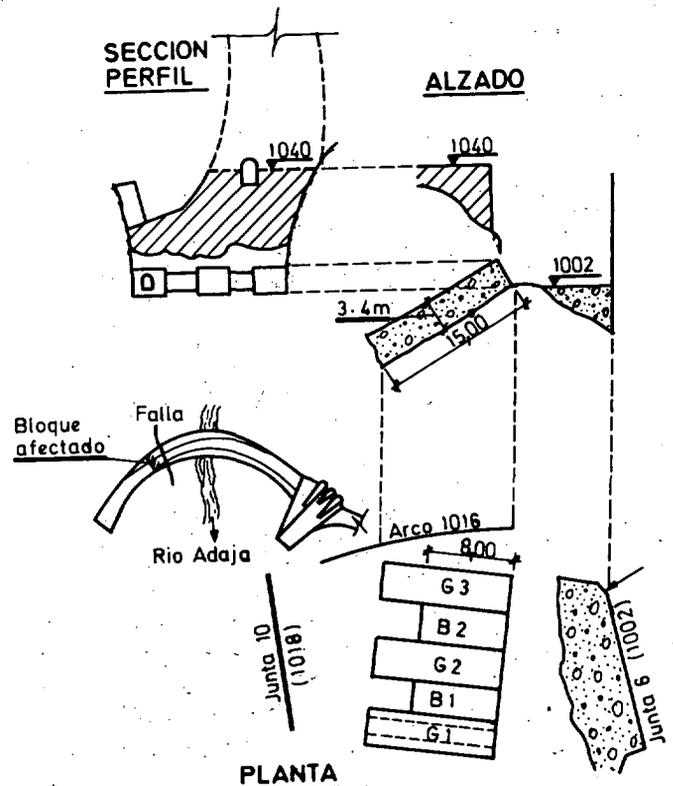


Fig. 3.4.

La falla, que describimos al final del subapartado 3.1.d), ha sido tratada como sigue:

Se ha saneado una franja de ancho igual a la de la cimentación y 7 m. de longitud, según la línea de máxima pendiente del plano de buzamiento de aquella, seguida de tres galerías de unos 14 m² de sección, y 8 m. de longitud, siendo visitable la situada más aguas abajo, tal como se indica en la fig. 3.4, las galerías van armadas con las cerchas metálicas perdidas, que se han utilizado para su perforación suplementada con una armadura longitudinal. A pesar de que se trata de una falla muerta (no activa); se han dispuesto para su auscultación, cuatro extensómetros de varillas, en distintas direcciones.

Finalmente digamos que antes de elegir la solución bóveda como la más favorable, se han estudiado —comparativamente— las cinco siguientes soluciones de cierre, con los presupuestos relativos que se dan junto a cada una de ellas.

PRESUPUESTO

1. Presa de gravedad	100 %
2. Presa de material suelo (escollera)	85 %
3. Presa de bóvedas múltiples ...	82 %
4. Presa bóveda B-1	78 %
5. Presa bóveda B-2 (solución elevada)	77 %

Naturalmente la solución B-2, no se ha elegido frente a la B-1, por ser —teóricamente— menor su presupuesto, sino por ofrecer unas ventajas que aquí no exponemos por estar fuera de lugar.

A continuación, damos una documentación gráfica de la presa del Castro de Las Cogotas.

3.2. Presa del Pontón Alto

La presa del Pontón Alto, de 48 m. de altura sobre cimientos, crea un embalse de 7,4 HM³, con fines de abastecimiento de agua potable —principalmente—, laminación de avenidas,

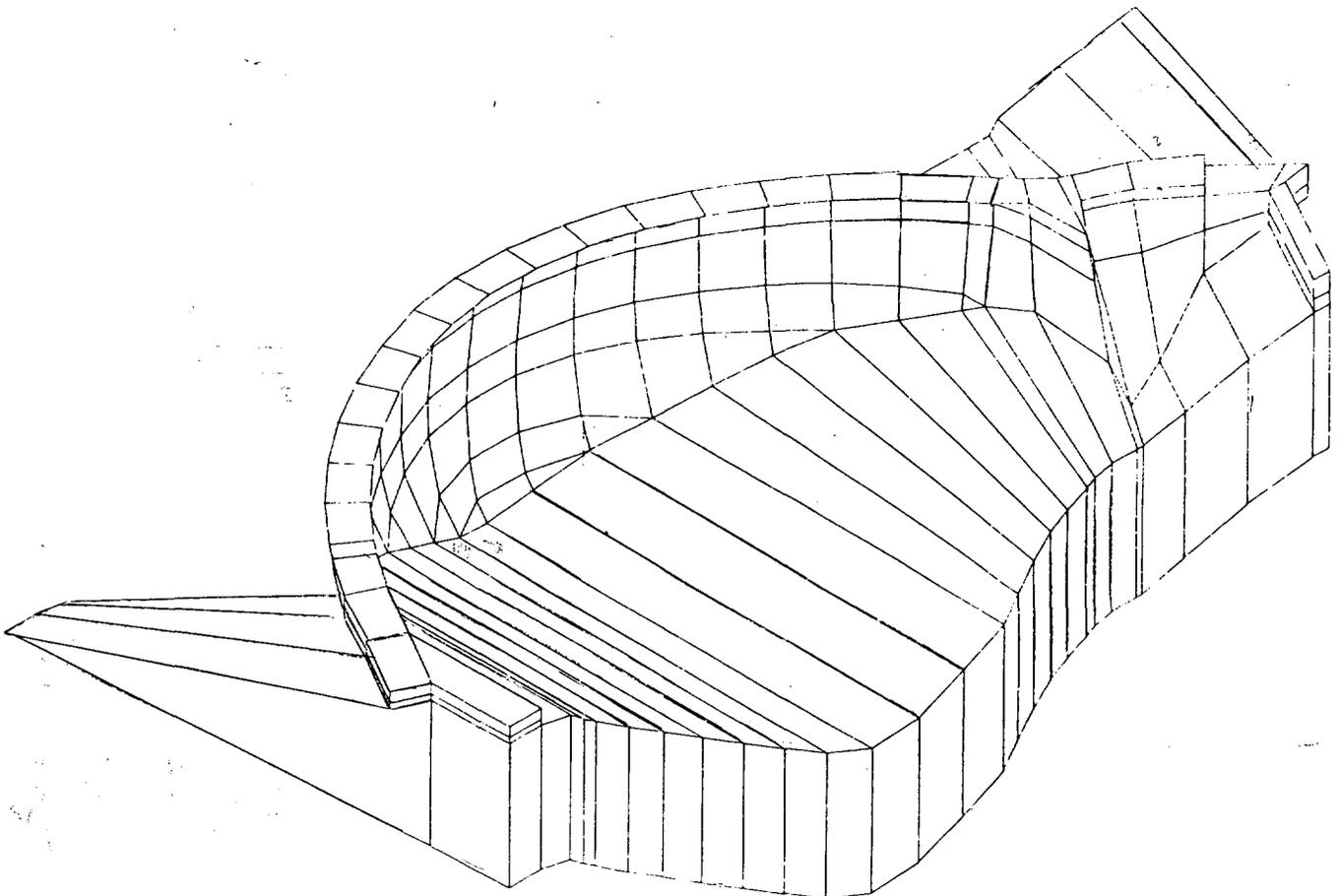


Fig. 3.5.—Perspectiva del modelo matemático de la Presa del Castro de las Cogotas.

DISEÑO DE PRESAS BOVEDA EN CERRADAS ANCHAS

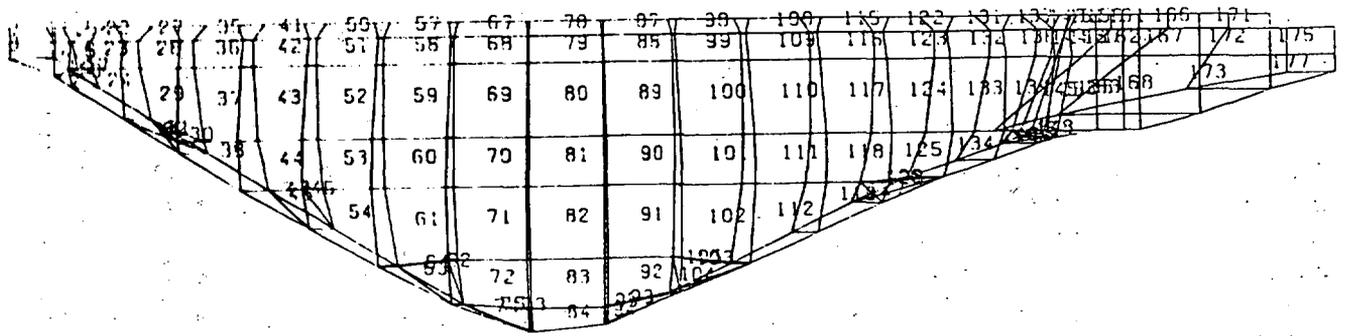


Fig. 3.6. - Modelo matemático de la Presa del Castro de las Cogotas.

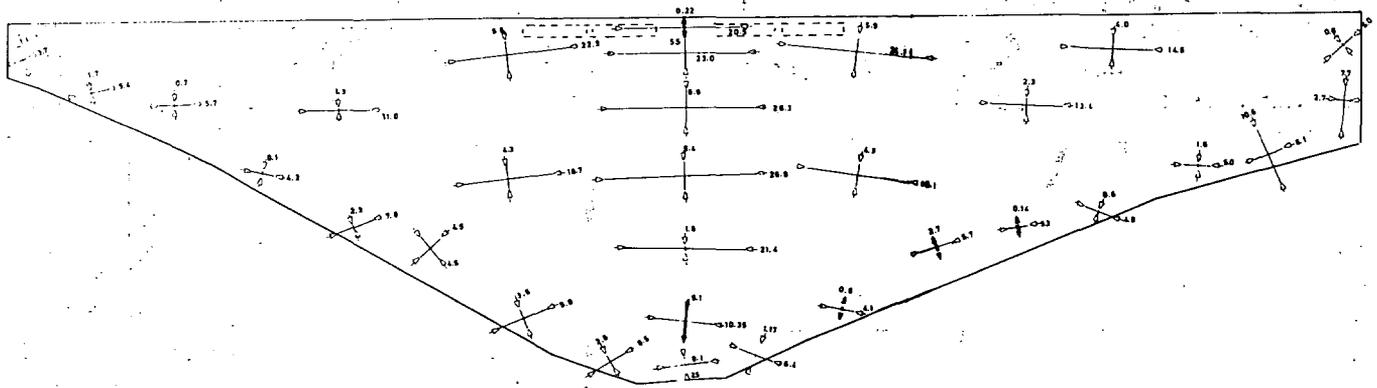


Fig. 3.7. - Presa del Castro de Las Cogotas. Estado tensional del paramento de aguas arriba.

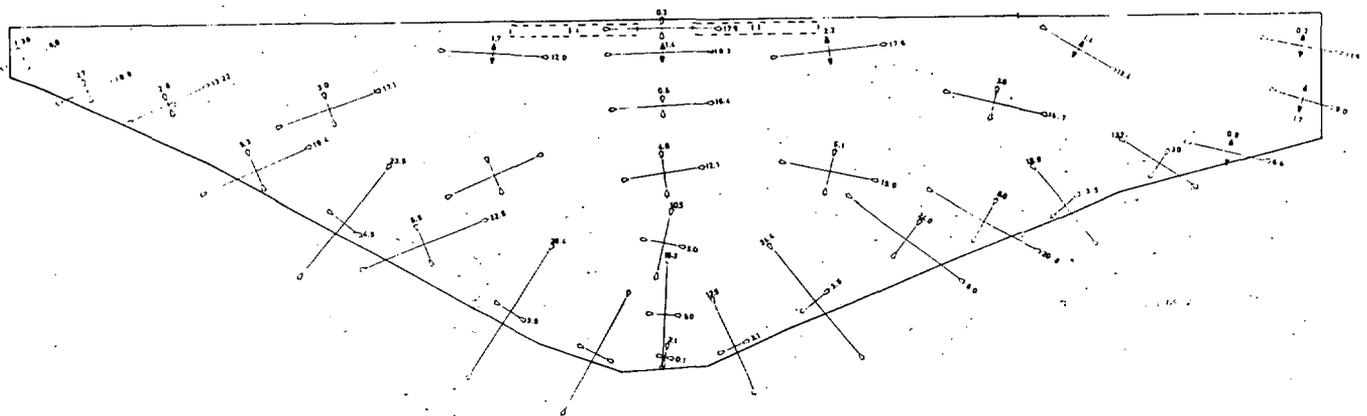


Fig. 3.8. - Presa del Castro de Las Cogotas. Estado tensional del paramento de aguas abajo.



Fig. 3.10.—Presa del Castro de Las Cogotas. Vista general.

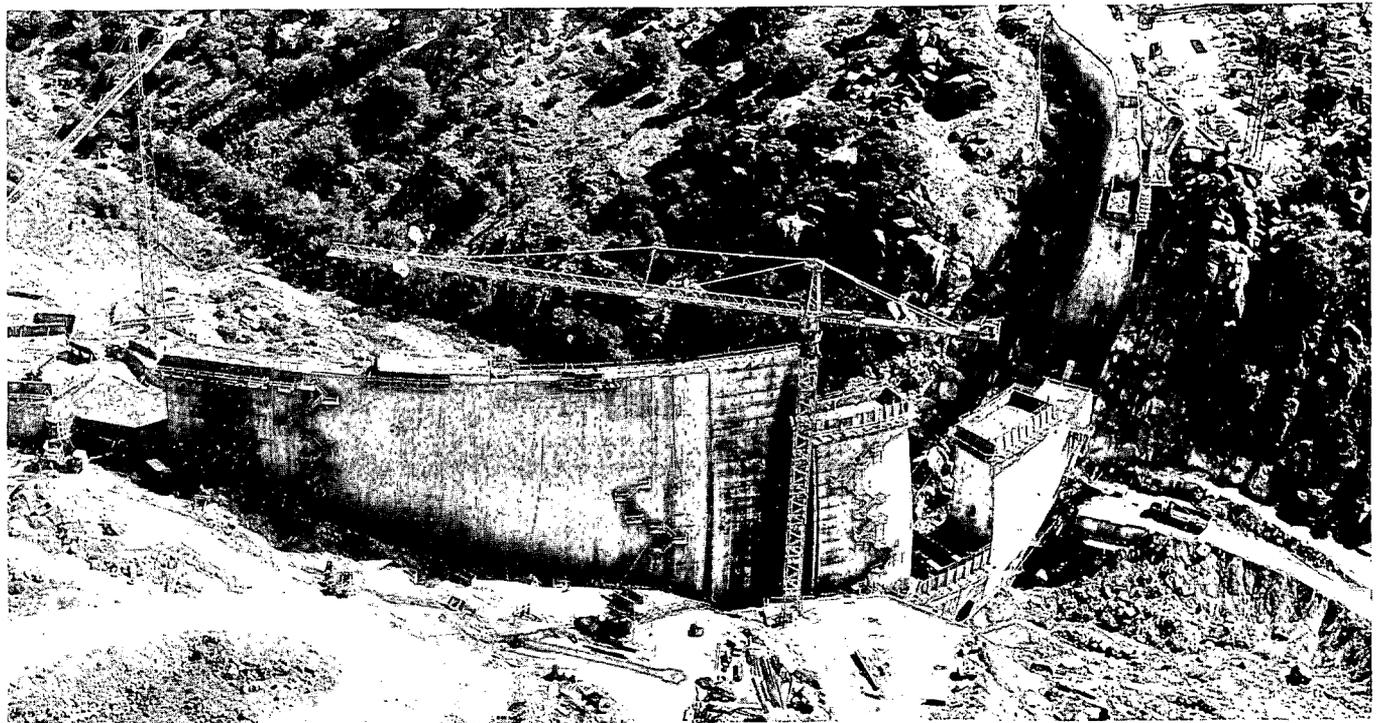


Fig. 3.11.—Presa del Castro de Las Cogotas. Vista desde aguas arriba. Octubre 1987.



Fig. 3.12.—Presa del Castro de Las Cogotas. Vista desde aguas abajo. Diciembre 1987.

ecológicos y urbanísticos, y finalmente, con pequeña importancia, regadío. Decimos urbanísticos, porque el embalse, regula las aguas del río Eresma —normalmente seco en estiaje— que circunda la ciudad de Segovia. Los planos fundamentales de la presa se incluyen en las figuras 3.14 y 3.15.

a) La cerrada donde se ubica la presa, se puede calificar de «muy ancha», figurando un desarrollo de aquella, y sus características geométricas, en la figura de abajo.

La presa, de 48 m. de altura sobre cimientos; se encaja sobre un macizo de rocas metamórficas principalmente (gneis glandulares), y graníticas (diques de pórfidos amellíticos). Existen dos familias de diaclasas subverticales y un plano de esquistosidad, que no ofrecen peligro al deslizamiento. La profundidad de cimentación puede situarse entre los 4 y 6 m. dependiendo de la zona de la cerrada.

b) La cuenca aportadora, de 150 Km² de

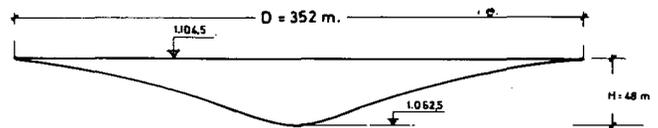


Figura 3.13.

$$\frac{C}{H} = \frac{287}{44} = 6,5 \quad \frac{D}{H} = \frac{352}{44} = 8 \quad \frac{P}{H} = 8,4$$

extensión, tiene un altura media y máxima de 1.700 y 2.430 m., respectivamente.

Sus aportaciones son:

Aportación media 113 Hm³

Aportación máxima 170 Hm³ En un período de 28 años.

Aportación mínima 47 Hm³

La onda de avenida, de 500 años de período de recurrencia tiene las siguientes características:

DISEÑO DE PRESAS BOVEDA EN CERRADAS ANCHAS

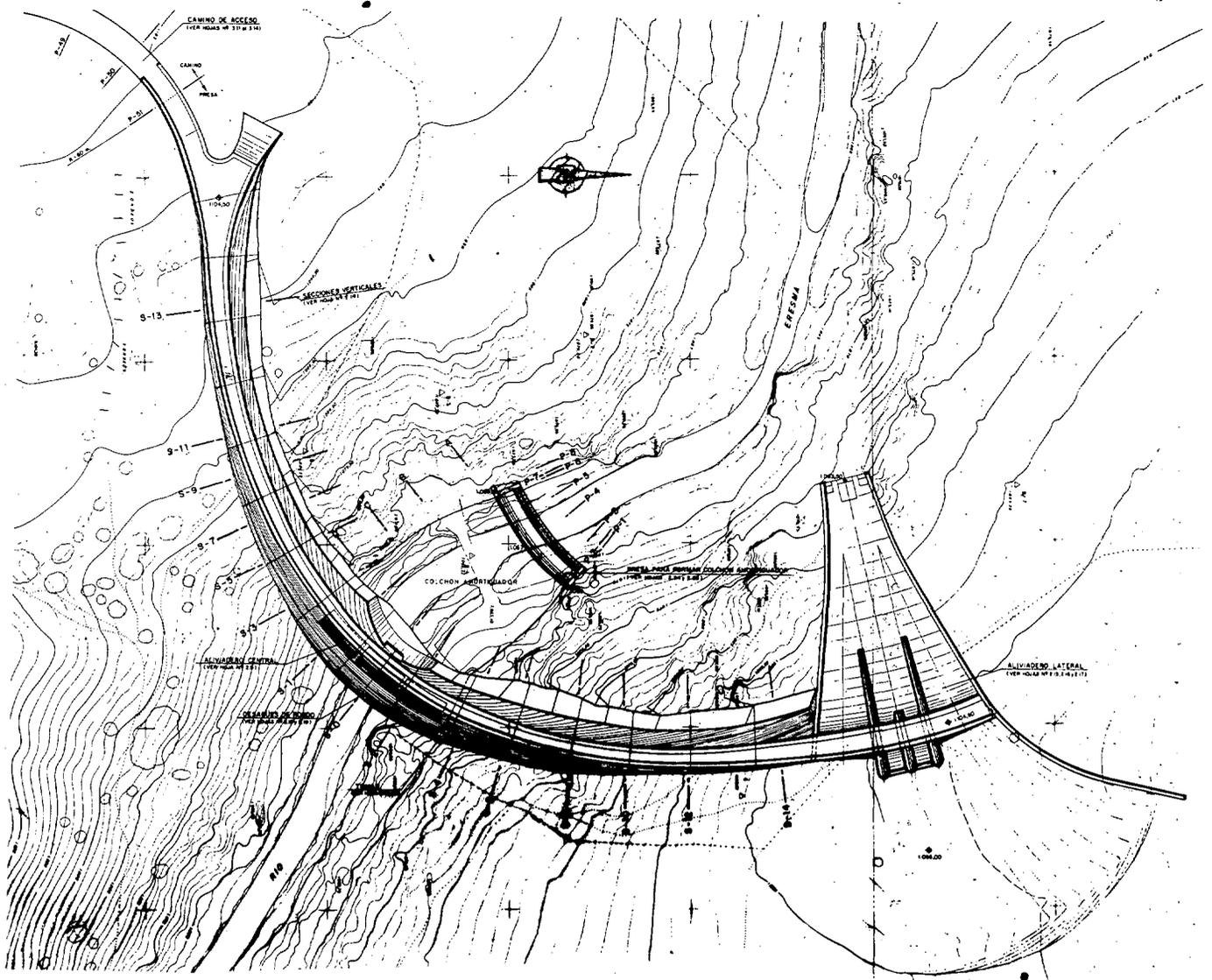


Fig. 3.14.—Presa del Pontón Alto. Planta General.

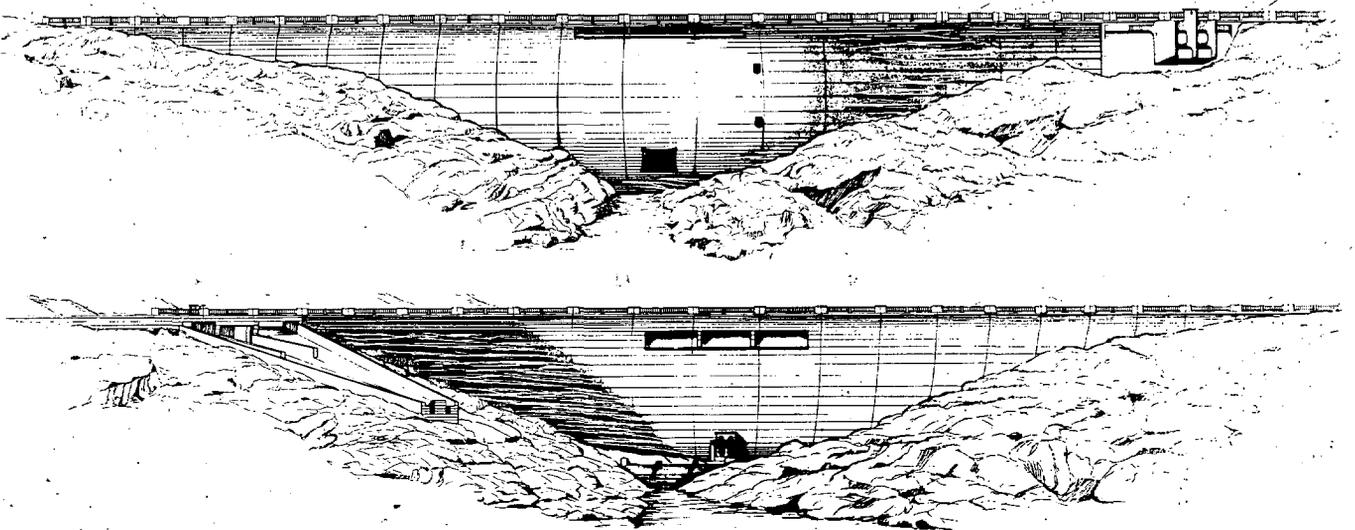


Fig. 3.15.—Presa del Pontón Alto. Alzados de aguas arriba y aguas abajo.

$Q_{\text{máx}} = 500 \text{ m}^3/\text{s}.$

Volumen = 7,1 Hm³.

Duración T = 8 horas.

Con estos datos de partida, el encaje de la bóveda y demás obras anejas se hace de forma muy parecida, al caso presentado anteriormente, y si lo incluimos aquí, resumidamente, es por el interés que tiene, en relación con el título de este artículo, la gran anchura de la cerrada, y por tanto de la bóveda —órgano principal del cierre— y que ha obligado a tomar en su diseño, bastantes innovaciones, en relación con el anterior.

Dada la enorme relación de la aportación media al volumen del embalse, y al volumen regulado (15,3 y 4,2 respectivamente), lo que equivale a decir que de los 117 Hm³ de aportación media, 90 Hm³ deben verse por el aliviadero, parece conveniente —en este caso también— proyectar el desagüe de las avenidas (ordinarias y extraordinarias) sin necesidad de maniobrar las compuertas.

Si se piensa, pues, desaguar las avenidas a través de una apropiada longitud de labio fijo, parece natural aprovechar la parte central de la coronación de la bóveda para proyectar un vertedero, con caída libre, de la mayor longitud posible, esto es: la que permita la forma de fondo del valle. Hemos ido a 3 vanos de 13 m., cada uno, separados por pilas de 1 m., dispuestos simétricamente, en relación con el eje de la presa.

Si queremos desaguar la máxima onda de avenida con la compuerta y todos los demás órganos de desagüe cerrados, con una lámina de 1,50 m. o poco superior, necesitamos unos 40 m. ó 35 m. de aliviadero lateral.

Ahora bien este aliviadero puede cumplir, conjuntamente con su labor propia, otras dos funciones de notable importancia:

- Contrarrestar el empuje, y servir de anclaje al extremo derecho de los arcos de los últimos 16 m. de bóveda (contando con el espesor de la cimentación, de unos 5,5 m.).

A este fin el aliviadero, que consta de dos tramos laterales de 16 m., y dos compuertas centrales de 4,5 m. x 4 m., se proyecta con una distribución de masas, muy asimétrica, de

modo que, mientras el primer tramo de la izquierda, tiene una suave pendiente, con una masa de 10.450 Tn., permitiendo por su forma el rígido anclaje de los arcos superiores, y por su peso contrarrestar su empuje, el tramo extremo, tiene una masa de 5.050 Tn. El tramo central tiene un volumen intermedio. Con esta distribución de masas el aliviadero, forma un rígido y pesado macizo de anclaje, escalonado, colaborando, al igual que en el caso de la Presa del Castro de Las Cogotas de forma muy importante, a absorber estos empujes transmitidos con un amplio margen de seguridad.

Su funcionamiento hidráulico, se ensayará en modelo reducido. Este aliviadero, es bastante parecido al de la presa del Castro de Las Cogotas, cuyas funciones son análogas, y en el que el ensayo hidráulico ha mostrado un funcionamiento muy satisfactorio.

El volumen de hormigón de este aliviadero es de unos 13.000 m³ y 62.000 m³, la bóveda.

Finalmente el aliviadero cumple la función de completar el cierre, en los últimos 100 m. de la margen derecha, prolongándose su aleta derecha en estribo de hormigón, hasta enlazar con la cota 1104,50 del terreno natural.

Dada la elevada relación

$$\frac{\text{desarrollo}}{\text{altura}} = 6,3$$

de la bóveda, en el proyecto ha habido que acentuar más las medidas de diseño que se exponen en el apartado 2.2. En efecto:

1. La curvatura de las ménsulas es muy acusada, motivando así —por el peso propio— una fuerte precompresión, en los sitios más traccionados por efecto del empuje hidrostático. Resulta así, que las máximas tracciones en el pie de agua arriba de las ménsulas de los bloques centrales (las más desfavorablemente solicitadas) sólo son de 4 ó 6 Kg/cm²., para las hipótesis:

- a) Peso propio + empuje hidrostático.
- b) Peso propio + empuje hidrostático + descenso térmico respectivamente.

2) La distribución de espesores en la ménsula central, tiene un gradiente pequeño, dándose los máximos hacia el cuarto de su altura.

Comparando las relaciones de espesores, en clave y base, de la ménsula central de las dos presas que describimos en este apartado 3, obtenemos, un valor notoriamente más alto para la presa del Pontón.

Las Cogotas

$$\frac{3,75}{10,50} = 0,36$$

Pontón Alto

$$\frac{4,75}{9,60} = 0,49$$

3) En la fig. 3.13 se ve la forma de la cerrada: muy ancha y con laderas convexas. En consecuencia, de acuerdo con lo expuesto en el apartado 2.4, debe irse a la de elegir los ángulos α ($\rho = \rho_0(z) e^{(1/\text{ctg } \alpha)}$), que definen las fibras medias de los arcos pequeños en la parte superior, aumentándolos, a manera que descendemos de coronación al fondo de la presa.

Así en la figura 3.16 en la que se indica la variación de estos ángulos, vemos que es $\alpha = 90^\circ$ (es decir arcos circulares) en los últimos 9 m., mientras que en la presa de Las Cogotas, era $\alpha 55^\circ$ a lo largo de toda la altura.

4) Conjugando la elección de la implantación, en el diseño de la bóveda, se ha logrado, simultáneamente, una muy favorable incidencia de los arcos en ambas laderas, junto con grandes ángulos centrales, que acentúen el trabajo en arco de la estructura.

En efecto, en la margen izquierda la tangente en arranque forma siempre un ángulo superior a los 45° con la línea de nivel correspondiente, con una media próxima a 60° , y lo que es más importante; estas tangentes, son prác-

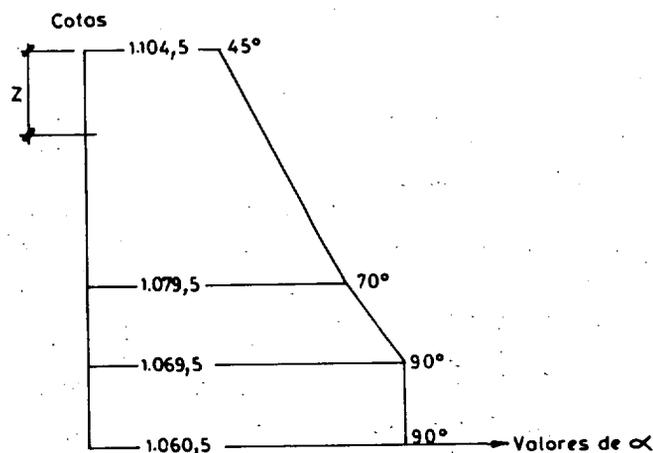


Figura 3.16.

tiamente normales al sistema de diaclasas, que en esta margen se presentan como el más desfavorable o peligroso.

Y por encima de la cota 1089,5 —en esta misma margen— hasta la coronación es decir, en los 15 m., finales, contando el espesor de la cimentación, los arcos se apoyan rigidamente en un estribo formado por el dique de cierre, que cumple además la tercera función de entronque del camino de acceso, que por coronación, va hasta las compuertas. Este estribo —que para su mejor función tensional y estética, es continuo así como su primera derivada, para cualquier sección— se completa por una pequeña prolongación, aguas abajo formando un efectivo estribo en horquilla de anclaje de estos arcos superiores que aumenta en considerable cuantía, el coeficiente de seguridad de la estructura (ver apartados 2.8 y 2.7).

En la margen derecha, en que la orientación de los sistemas de estratificación es favorable, las tangentes extremas a los arcos, forman ángulos superiores a 45° con las curvas de nivel con una media próxima a 60° , y por encima de la cota 1088,5 o sea en los 16 m. superiores (contando cimentación), los arcos se empotran, con muy amplio margen de seguridad, en el aliviadero lateral.

En cuanto a los ángulos centrales, como se muestra en la figura 3.17 de definición geométrica vemos que:

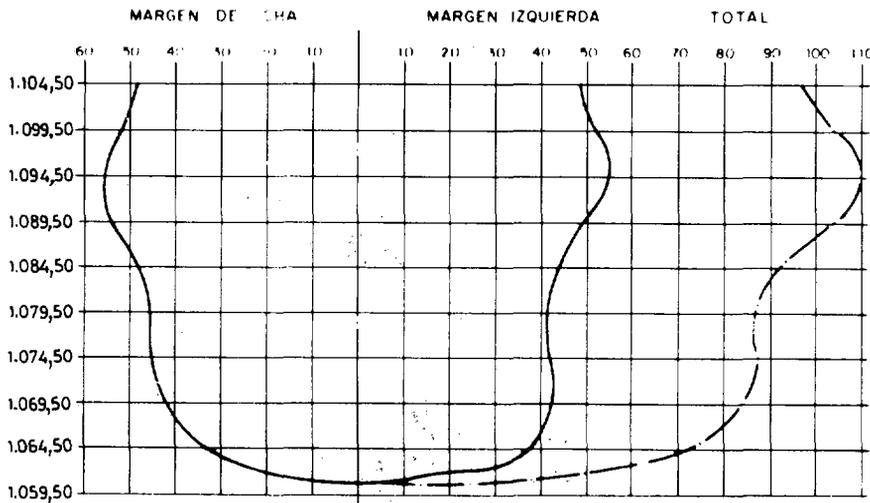
Entre las cotas 1104,5 y 1087, o sea, en una altura de 17,50 m. los ángulos centrales se mantienen entre 98° y 110° con una media de 105° .

Entre las cotas 1087 y 1069,5, o sea, en una altura de 17,50 m. los ángulos centrales se mantienen entre 98° y 85° con una media de 93° .

Y sólo por debajo de 1069,50, en los últimos 10 m. en que el trabajo en arco, por la proximidad del empotramiento de las ménsulas, es inevitablemente, insignificante, los ángulos centrales están por debajo de los 85° .

Terminamos pues, este comentario diciendo que: el logro de una segura y favorable incidencia de los arcos en las laderas, junto con el de la obtención de unos grandes ángulos centrales de éstos, ha sido plenamente alcanzado.

ANGULO (β) DE LAS SECCIONES HORIZONTALES



CENTRO DE CURVATURA EN CLAVE

COTA	β (En grados $^{\circ}$)		
	M.D.	M.I.	TOTAL
1.104,50	48,46	48,46	96,92
1.099,50	51,63	51,63	103,26
1.094,50	55,33	55,33	110,66
1.089,50	54,30	48,40	102,70
1.084,50	47,86	44,31	92,17
1.079,50	45,33	40,97	86,30
1.074,50	45,37	42,19	87,56
1.069,50	42,30	42,20	84,50
1.064,50	33,90	38,50	72,40
1.059,50	—	—	—

Figura 3.17.

Debido a todas las anteriores medidas se ha logrado, un estado tensional claramente satisfactorio.

En general, para todos los estados de carga, ambos paramentos están a compresión, excepto en una zona muy pequeña, en que las tracciones están comprendidas entre 3 y 6 Kg/cm². No obstante para evitar, que éstas suban excesivamente —a embalse vacío— en el pie de aguas abajo, ha sido necesario dispo-

ner pequeñas muletillas, en cada uno de los bloques contiguos al central, con lo cual, prácticamente se anulan éstas.

Un dibujo en perspectiva, del modelo matemático, que se ha utilizado para calcular, estado tensional de la estructura por el programa ADAP de elementos finitos, se muestra en la figura 3.18.

Los estados tensionales, del paramento de aguas arriba (el más desfavorablemente solici-

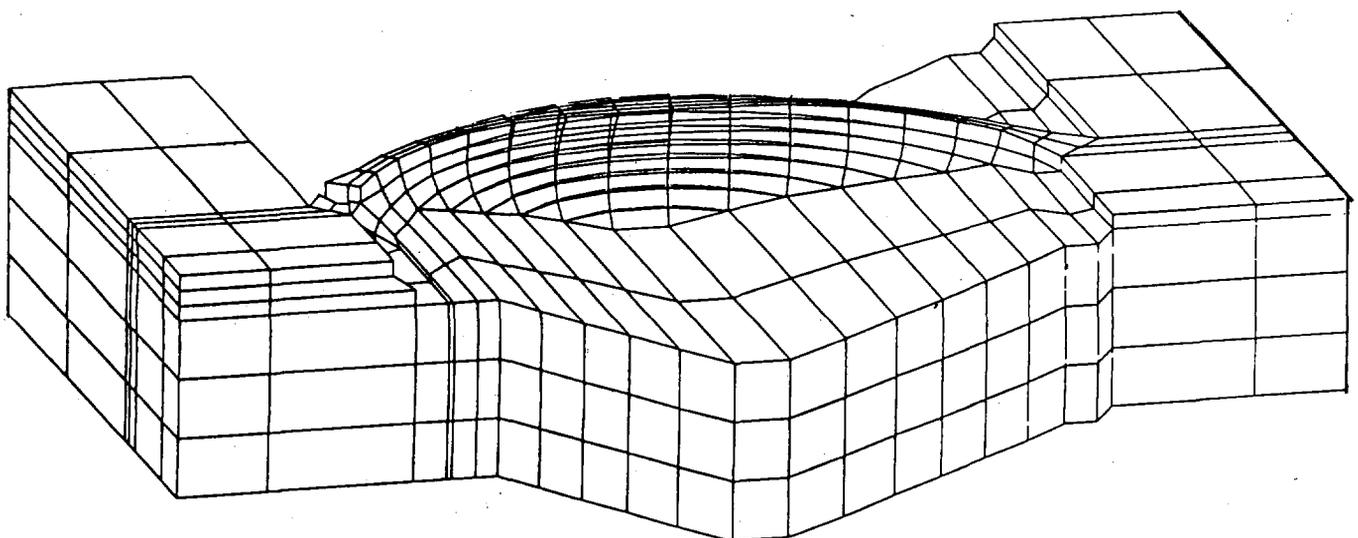


Fig. 3.18.—Presa del Pontón Alto. Perspectiva del modelo matemático.

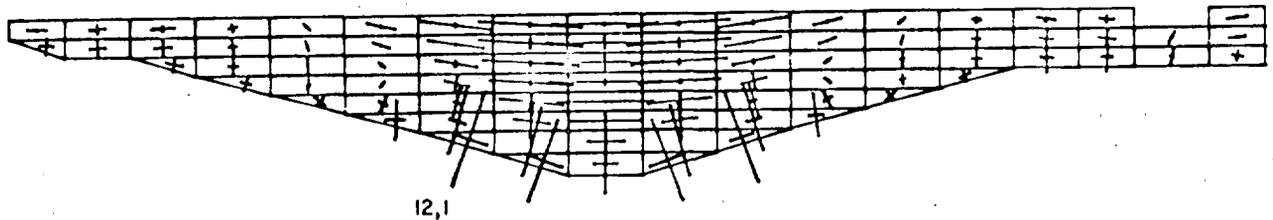


Fig. 3.19.—Presa del Ponton Alto. Estado tensional del paramento de aguas arriba.

tado) se incluyen en la figura 3.19. Las tracciones que figuran en éstas son considerablemente más altas que las definitivas, por corresponder a un diseño, que se modificó después, aumentando el desplome de las ménsulas centrales, y la curvatura de los arcos inferiores.

4. PRESAS EN ARCO

Para cierres de pequeña o moderada altura, puede ser una solución —simple y económica— las presas en arco, con el paramento, aguas arriba, cilíndrico, y el de aguas abajo, también, o con un ligero talud constante; esto es: con secciones verticales rectangulares o trapezoidales, como los de las figs. 4.1.a) y b) respectivamente.

Estas estructuras de cierre, de formas muy simples, implican así mismo, una solución y proceso constructivo, muy sencillo.

Las presas con secciones del tipo a) ó b), favorecen el trabajo en arco, y disminuyen el de las ménsulas, al ser dichas secciones, flexibles

en la base, y con un apoyo notorio en coronación, motivado por la rigidez de los arcos superiores. Lo contrario ocurre con secciones triangulares del tipo c). Esto se hace más patente, a medida que la cerrada es más ancha, es decir, en los cierres objeto de este artículo.

Por ello —opinamos— que al menos para cerradas achas, la llamada presa «arco-gravedad» con secciones verticales triangulares, es un diseño contradictorio: Por un lado, busca el trabajo en arco, con su planta curvada; y por otro lo evita, favoreciendo el trabajo en voladizo, con su sección triangular con gran rigidez en su parte inferior y muy pequeña en los arcos superiores, especialmente, en cerradas anchas.

La presa en arco con perfil tipo a) ó b) cumple, cabalmente, en fin con el que se concibió su diseño: Conseguir el trabajo en arco de la estructura, y por tanto, también el logro de la transmisión del empuje hidrostático, preponderadamente hacia las laderas —canalizado a través de los arcos— lo que supone un considerable ahorro, respecto a la masa de fábrica necesaria, para resistir aquel empuje simple-

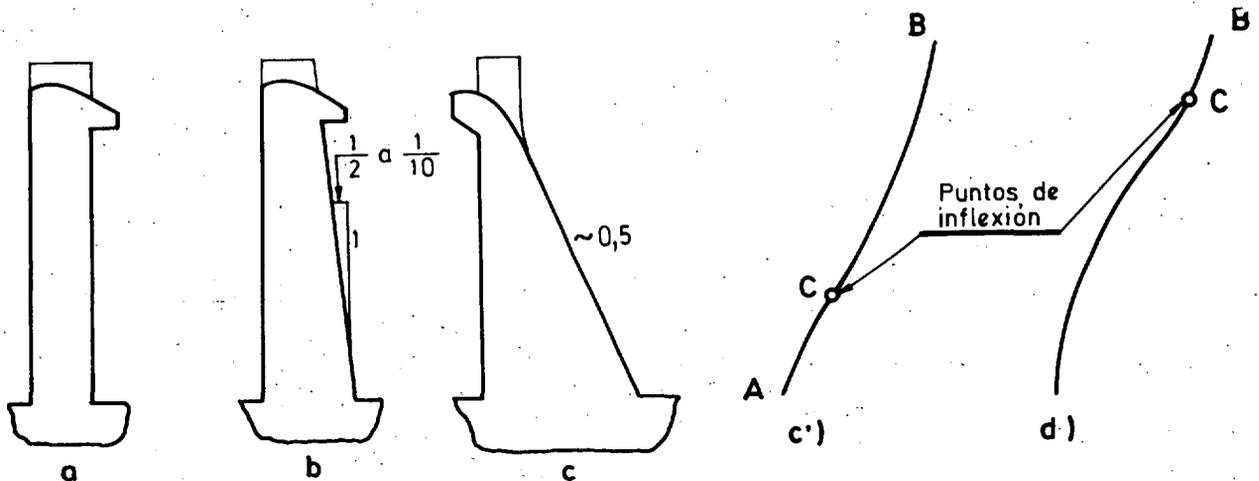


Figura 4.1.

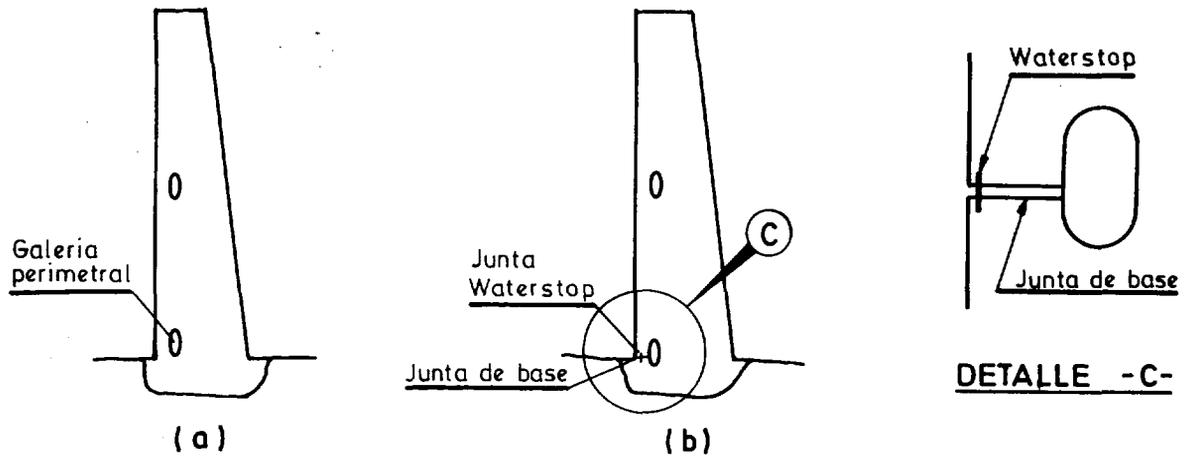


Figura 4.2.

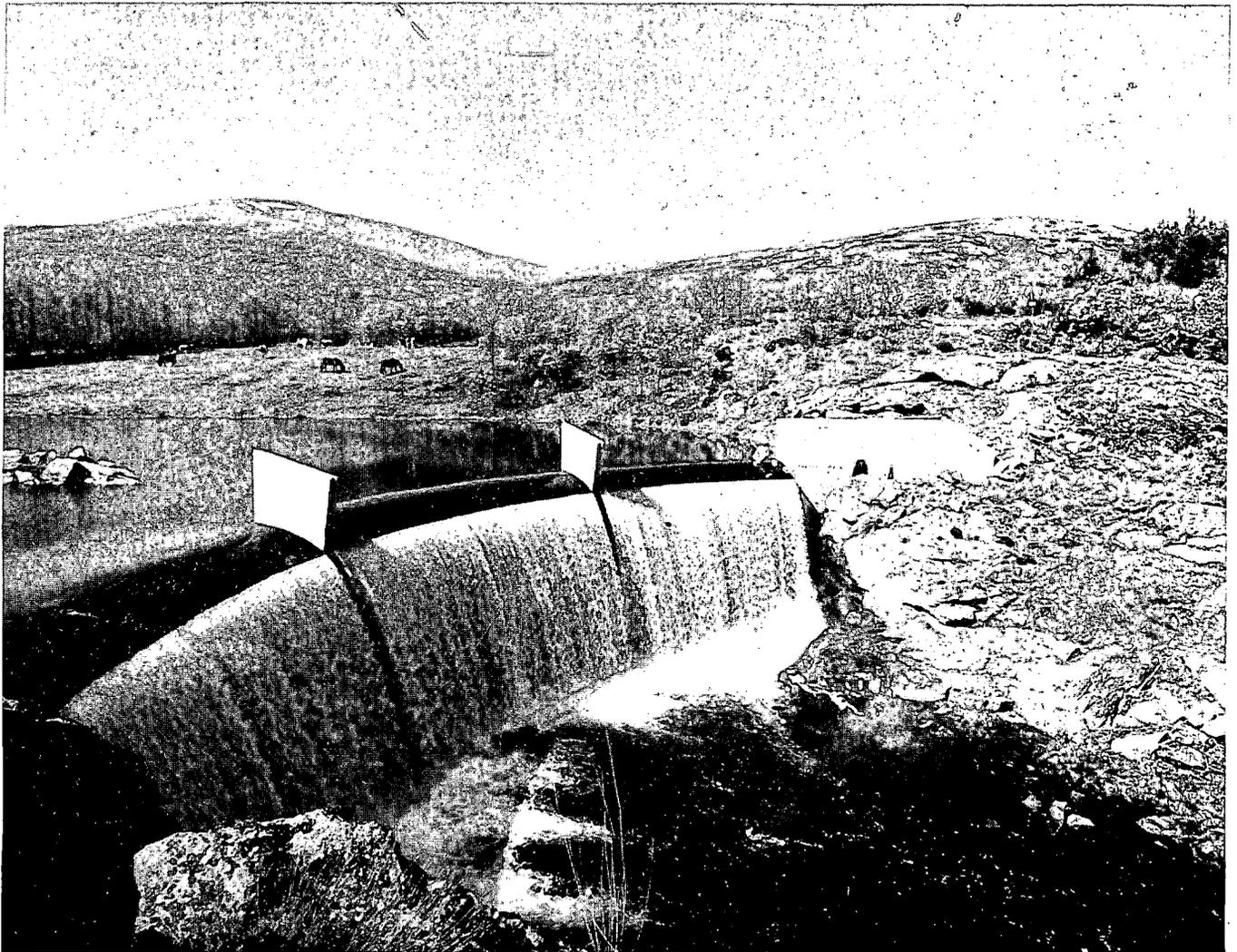


Fig. 4.3.—Presa del Barco de Avila. Río Aravalle.

DISEÑO DE PRESAS BOVEDA EN CERRADAS ANCHAS

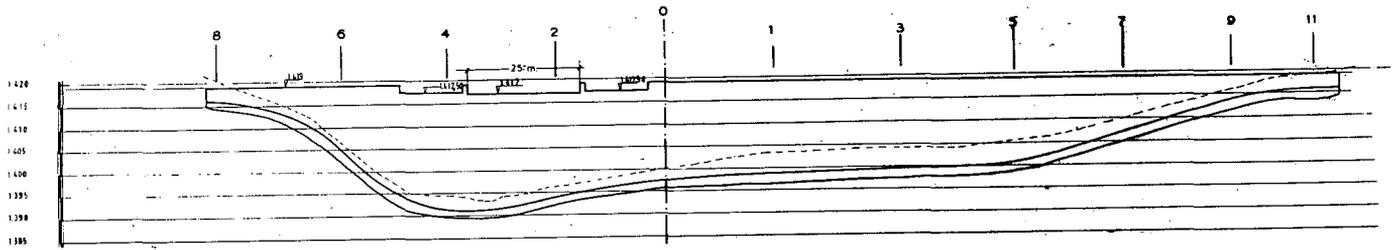


Fig. 5.1.—Alzado desde aguas arriba.

mente por su rozamiento con la roca de la base de la fundación.

Para cerradas muy anchas, puede acentuarse el trabajo en arco, y hacer desaparecer —o disminuir en gran cuantía— las tracciones, que para embalse lleno y descenso térmico, aparecen en el pie de aguas arriba las ménsulas centrales (Fig. 4.2), disponiendo —como en las presas bóveda— una junta de base.

Este perfil se presta muy bien a disponer el aliviadero en coronación, tal como se ve en las figs. 4.1.a) y b) en la 4.3, que muestra una presa de este tipo —situada junto al Barco de Avila —ESPAÑA— que vierte durante no menos de 10 meses al año.

5. EJEMPLO DE UNA PRESA EN ARCO

5.1. Generalidades

Exponemos, a continuación, un resumen de las características más salientes de la presa en arco de Torrecaballeros, sobre el río Pirón, en Segovia, ESPAÑA, su fin es el abastecimiento

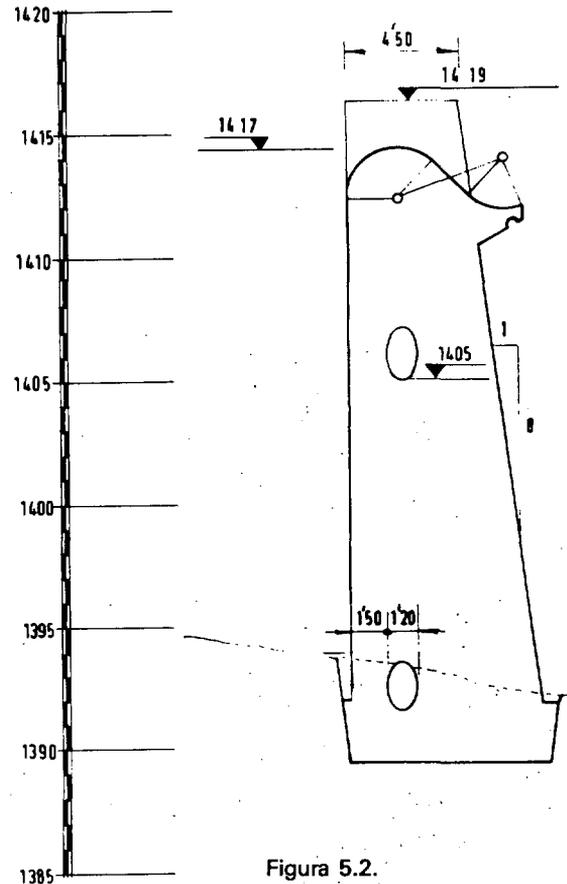


Figura 5.2.

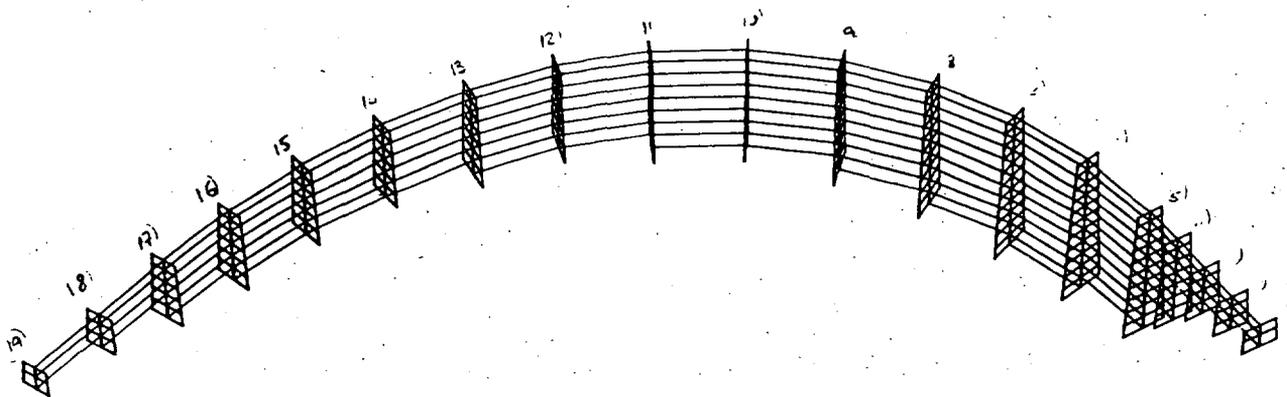


Figura 5.3.

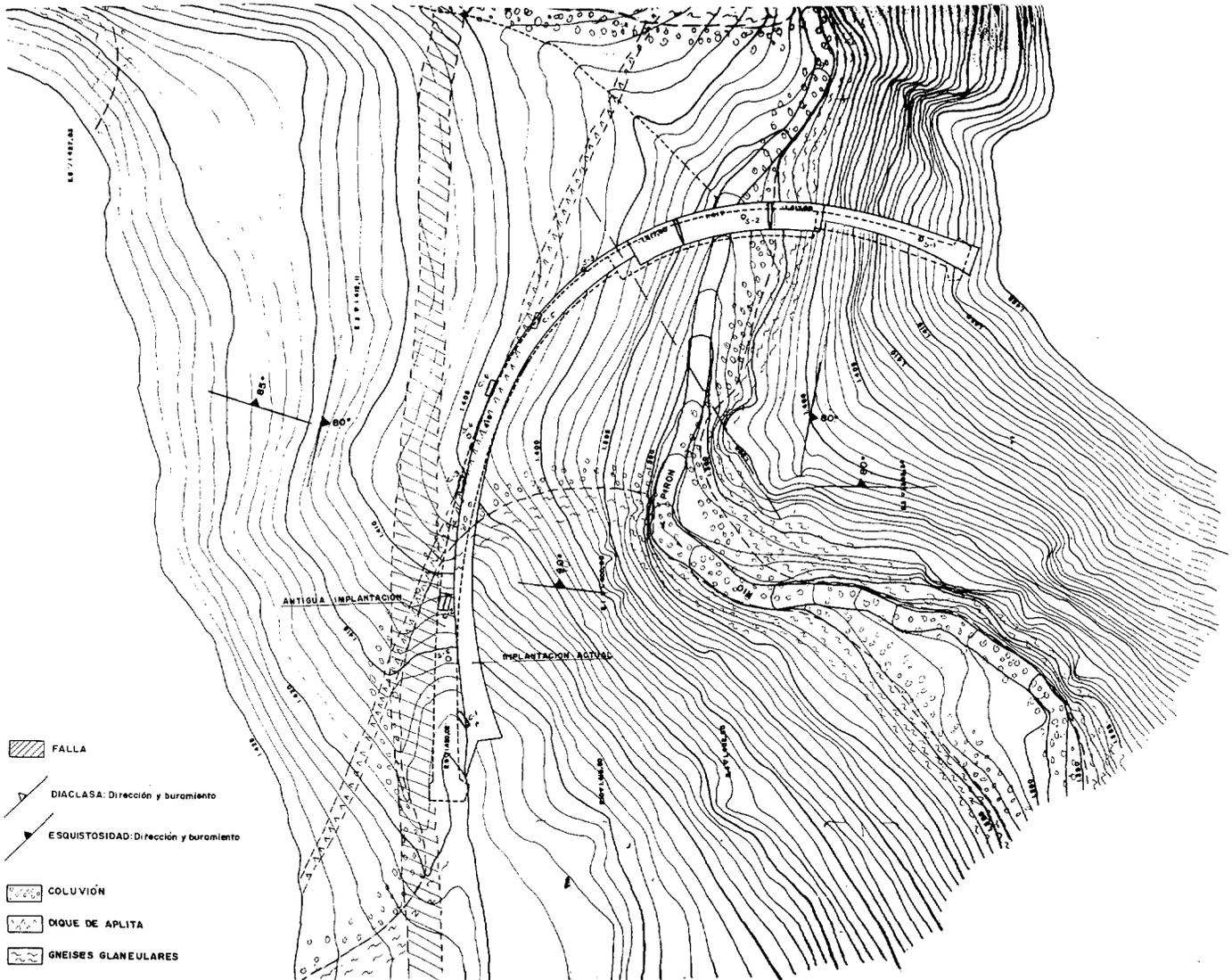


Figura 5.4.

de agua a Torrecaballeros y nueve núcleos ganaderos más.

Se trata de una cerrada, fuertemente asimétrica, y muy ancha, como puede apreciarse en la figura 5.1. Las figs. 5.2 y 5.3, muestran la sección tipo, y una perspectiva del modelo matemático, que se ha utilizado, para el cálculo tensional.

En la fig. 5.4 puede verse su planta, figurando de puntos, su implantación primitiva, que se varió ligeramente, para salvar una falla, que también, aparece rayada, en la citada figura.

5.2. Descripción de la estructura

Es una presa en arco, de paramento aguas

arriba cilíndrico, compuesto por tres arcos de círculo, y unos pequeños tramos rectos extremos. Los radios extremos, son aproximadamente un 75 por 100 mayores que el central, con objeto de acercarse al antifunicular de las cargas tomadas por los arcos.

El paramento de agua abajo tiene un talud constante de $1/8$, con directriz, en coronación compuesta por cuatro arcos de círculo.

En su parte central, el espesor en coronación, es constante, de 4,50 m., siendo, por tanto, también en esta parte la sección vertical invariable, o lo que es lo mismo, un cuerpo de revolución, de 90° de ángulo central. En las partes extremas, el espesor en coronación, es

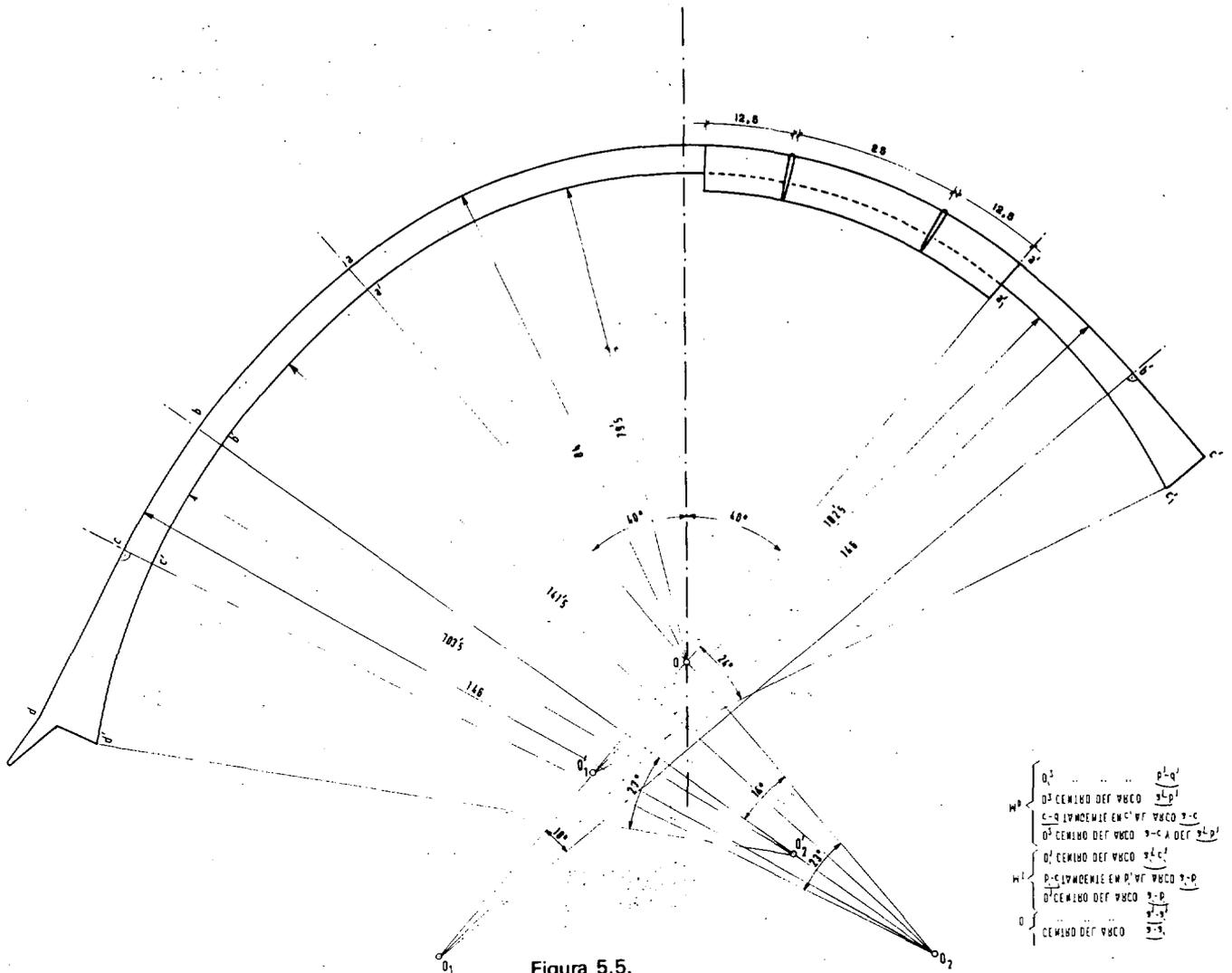


Figura 5.5.



Fig. 5.6.—Estado compuesto 1: Peso propio + empuje hidrostático (nivel extraordinario).

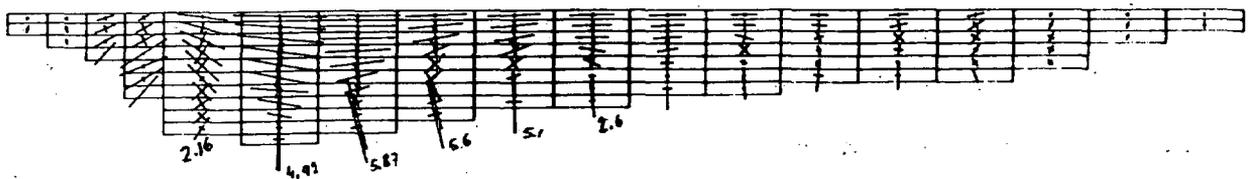


Fig. 5.7.—Estado compuesto 2: Peso propio + descenso de temperatura (embalse vacío).

