

# las presas más altas del mundo

comparación entre espesores suizos y americanos

W. H. HOLMES, ingeniero

En el número 73 de esta revista se publicó un artículo dedicado a la presa de Grande Dixence, obra tipo gravedad, que, por su altura—281 m—, será, una vez terminada, la mayor del mundo.

La presa americana Hoover, de 221,3 m de altura, también de gravedad en combinación con una parte en arco, en la que la zona de gravedad trabaja con una carga menor a la correspondiente a la carga máxima hidrostática, tiene un espesor en la base del 91 % de su altura. La presa de Grande Dixence, proyectada para trabajar a plena carga hidrostática por simple gravedad, tiene un espesor de base del 77 % de su altura.

Ante esta diferencia tan manifiesta cabe preguntarse si el Bureau of Reclamation se sintió abiertamente prudente en sus cálculos o, por el contrario, los suizos han proyectado atrevidamente.

Otra comparación similar podría hacerse con la presa de referencia y la de Shasta, igualmente proyectada por el Bureau of Reclamation, estructura genuinamente de gravedad, de 183 m de altura, a la que se le ha dado el mismo espesor en el pie que su altura, es decir, el 100 % de ésta.

Si se aplica la misma sección de la presa Shasta sobre la de Grande Dixence, haciendo coincidir el plano superficial del agua de las dos presas a una misma altura en los paramentos de aguas arriba, la proyección de los paramentos en la de Shasta para una altura de 281 m, correspondiente a la de la presa Grande Dixence, es de 303,60 m. En otros términos, esto quiere decir que el espesor que co-

respondería a la presa de Shasta sería de 303,60 m, o, lo que es igual, el 40 % más que el de la Grande Dixence, debido en primer lugar al talud que tiene la presa de Shasta en el paramento de aguas arriba.

La tensión máxima calculada en el pie del paramento de aguas arriba de la presa de Shasta es de 41,2 kg/cm<sup>2</sup> y 52,3 en el de aguas abajo, mientras que en la de Grande Dixence las tensiones correspondientes son de 75 kg/cm<sup>2</sup> y 130.

Desde 1938, fecha en que fué construída la presa de Shasta, el Bureau of Reclamation ha aumentado las tensiones por él admitidas en la redacción de proyectos para masas de hormigón sometidas a condiciones extremas de carga, a 70,30 kg/cm<sup>2</sup>, a excepción de que, en ningún caso, se excederá de un cuarto de la resistencia máxima a compresión obtenida con probetas cilíndricas de 15×30 cm de un año de vejez.

Aun con esta liberación adicional, las tensiones toleradas por el Bureau se hallan considerablemen-



grande dixence

te por debajo de las permitidas en Suiza; así, pues, resulta interesante estudiar con más detenimiento el criterio suizo en esta clase de obras.

Según el ingeniero suizo Hunerwadel, encargado de la construcción de la presa Grande Dixence, la carga de trabajo en el paramento de aguas arriba y a cualquier nivel deberá ser mayor al 85 % de la presión hidrostática en el mismo nivel.

Puesto que la sección de la presa Grande Dixence se aproxima a un triángulo con un lado vertical coincidiendo con la superficie del paramento de aguas arriba, las tensiones aproximadas se pueden hallar analíticamente considerando un triángulo semejante cuyo vértice superior se halle a nivel con el plano de aguas máximas. El talud del paramento de aguas abajo de una sección triangular con un lado vertical coincidiendo con el paramento de aguas arriba, cuando este último se halle sometido a una presión vertical determinada y con agua al nivel del vértice superior, que representaremos por  $m$ , se obtiene analíticamente partiendo de la forma triangular de la sección y en función del

peso específico del hormigón y de la presión hidrostática, desarrollo que conduce a la expresión final:

$$m = 1/(a-p)^{1/2},$$

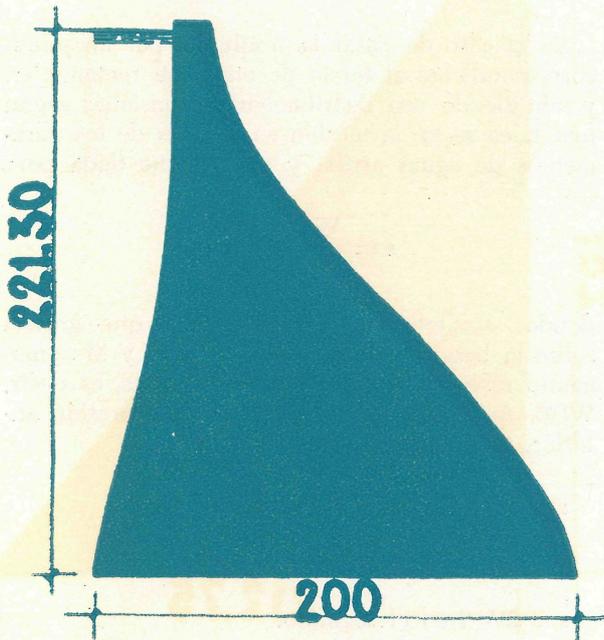
donde:  $m$ , tangente del ángulo que forma el talud con la vertical;  $a$ , peso específico del hormigón, y  $p$ , presión deseada, en por ciento de la hidrostática, que, en este caso, es de 0,85.

Así, pues, suponiendo que el peso específico de 1 cm<sup>3</sup> de hormigón es de 2,450 gr y que el peso de 1 cm<sup>3</sup> de agua es de 1 gr, el 85 % de la presión por centímetro cuadrado será 0,850 gr, es decir, que sustituyendo en la expresión anterior tendremos:

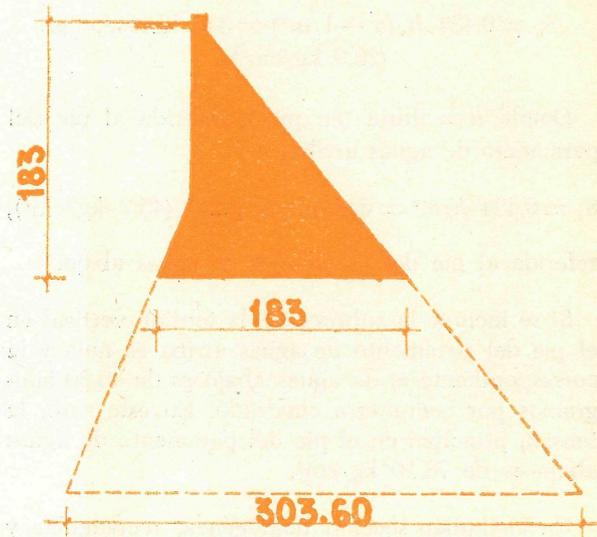
$$m = 1/(2,45 - 0,85)^{1/2} = 1/1,265 = 0,79,$$

valor que corresponde aproximadamente con el de la sección de Grande Dixence. De donde se infiere que el proyecto de esta presa sigue este criterio.

El criterio suizo de admitir una carga de trabajo en el paramento de aguas arriba mayor del 0,85 de



hoover



shasta

la presión hidrostática, puede compararse con las exigencias de otros proyectos. Maurice Levy propuso, hace ya sesenta y un años, que la carga vertical en el paramento de aguas arriba excediese a la presión hidrostática. Según Levy, el talud del paramento de aguas abajo es:

$$m = 1/(2,45 - 1)^{1/2} = 0,833.$$

El Bureau of Reclamation utilizó una carga mínima de trabajo para el paramento de aguas arriba de más del 67 % de la presión hidrostática en la presa de Shasta, dando un talud de 0,81 al paramento de aguas abajo, con la condición de proyectarse a 6,85 m por encima del nivel de aguas máximas. Es evidente que, observando las dos comparaciones anteriores, el primer criterio no es la causa de la gran diferencia de espesores entre Shasta y Grande Dixence.

Cuando el embalse se halle vacío, la tensión vertical en el pie de aguas arriba de la presa Grande Dixence será:

$$S_h = w_c h = \frac{2.450 \times 281}{10.000} = 68,8 \text{ kg/cm}^2,$$

donde:  $w_c$ , peso del metro cúbico de hormigón, y  $h$ , altura (en metros). En el pie correspondiente a paramento de aguas abajo, la tensión será nula.

Cuando el embalse se halla lleno y sin subpresión, las tensiones en los pies de aguas arriba y abajo serán:

$$S_h = 0,434 h (a - 1/m^2) = 340 \text{ libras/pulg}^2 \\ (23,9 \text{ kg/cm}^2).$$

Donde  $h$  = altura (en pies), referida al pie del paramento de aguas arriba; y

$S_b = 0,434 h/m^2 = 643 \text{ libras/pulg}^2 (45,2 \text{ kg/cm}^2)$ , referida al pie del paramento de aguas abajo.

Si se incluye la subpresión, la tensión vertical en el pie del paramento de aguas arriba es nula y la correspondiente al de aguas abajo es de 45,20 kilogramos por centímetro cuadrado. En este caso, la tensión principal en el pie del paramento de aguas abajo es de 73,10 kg/cm<sup>2</sup>.

En cualquier sección homogénea, rectangular y horizontal, sometida a una carga vertical, la posición de la carga afecta concretamente la distribu-

ción de tensiones. Por el contrario, al conocer las tensiones en los pies de los paramentos de aguas arriba y abajo puede ser determinada la resultante de las fuerzas. En este caso, en el que la tensión en el pie del paramento de aguas arriba es nula, la resultante del peso del hormigón, la presión hidrostática sobre el paramento vertical y la subpresión pasa por el tercio de la sección hacia aguas abajo. De donde se deduce que cualquier carga adicional horizontal, como, por ejemplo, el efecto de un sismo, mueve el punto de aplicación de la resultante más allá del punto situado a un tercio, produciendo tracción en el paramento de aguas arriba.

De acuerdo con el artículo publicado por el ingeniero suizo Hunerwadel, el segundo criterio es que, con el embalse lleno y efecto sísmico, la resultante de todas las fuerzas—peso de la presa, presión hidrostática y subpresión—permanecerá dentro de los dos tercios centrales de cada sección horizontal. De ser esta interpretación correcta respecto a las exigencias suizas para el proyecto de presas de gravedad, es evidente que se permiten tracciones de gran consideración. Las prácticas americanas tienden a evitar la tracción en el hormigón en masa, siguiendo el criterio de que la resultante de todas las fuerzas debe pasar por el tercio central de cada sección. Esta exigencia de que la resultante pasa por los dos tercios centrales en lugar del tercio central, presenta una diferencia importante en la redacción del proyecto.

En el caso de pasar la resultante por un punto correspondiente al tercio de una base rectangular, y admitiendo una distribución de tensiones según una línea recta, la tensión en los pies de los paramentos de aguas arriba y abajo viene dada por:

$$s = \frac{W}{l} \mp \frac{6M}{l^2},$$

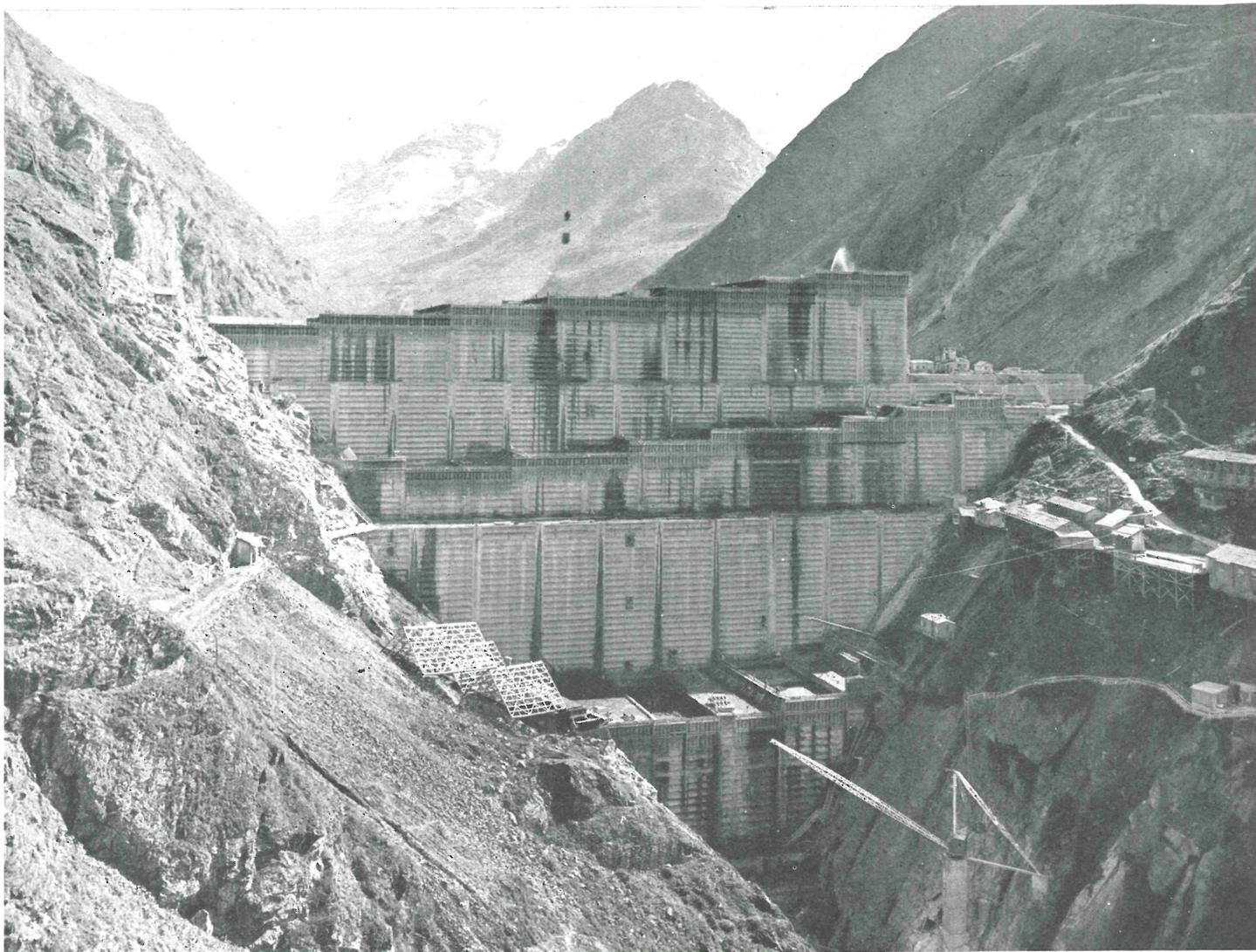
donde:  $s$  = tensión;  $W$  = peso total que gravita sobre la base;  $l$  = longitud de la base, y  $M$  = momento respecto al eje central de la base, es decir,  $Wl/6$ . Así, pues, sustituyendo en la expresión anterior, tendremos:

$$s = W/l \mp W = 0 \text{ en el primer caso}$$

y

$$s = 2W/l \text{ en el segundo.}$$

Para el caso del segundo criterio suizo, en el



Estado actual de la presa Grande Dixence, en construcción, en la que se emplearán 5,8 millones de metros cúbicos de hormigón.

que la resultante pasa por un punto situado en la sexta parte de la base, tendremos:

$M = wl/3$ ;  $s = W/l \mp 2W/l = -W/l$  para el primer caso, y  $3W/l$  para el segundo.

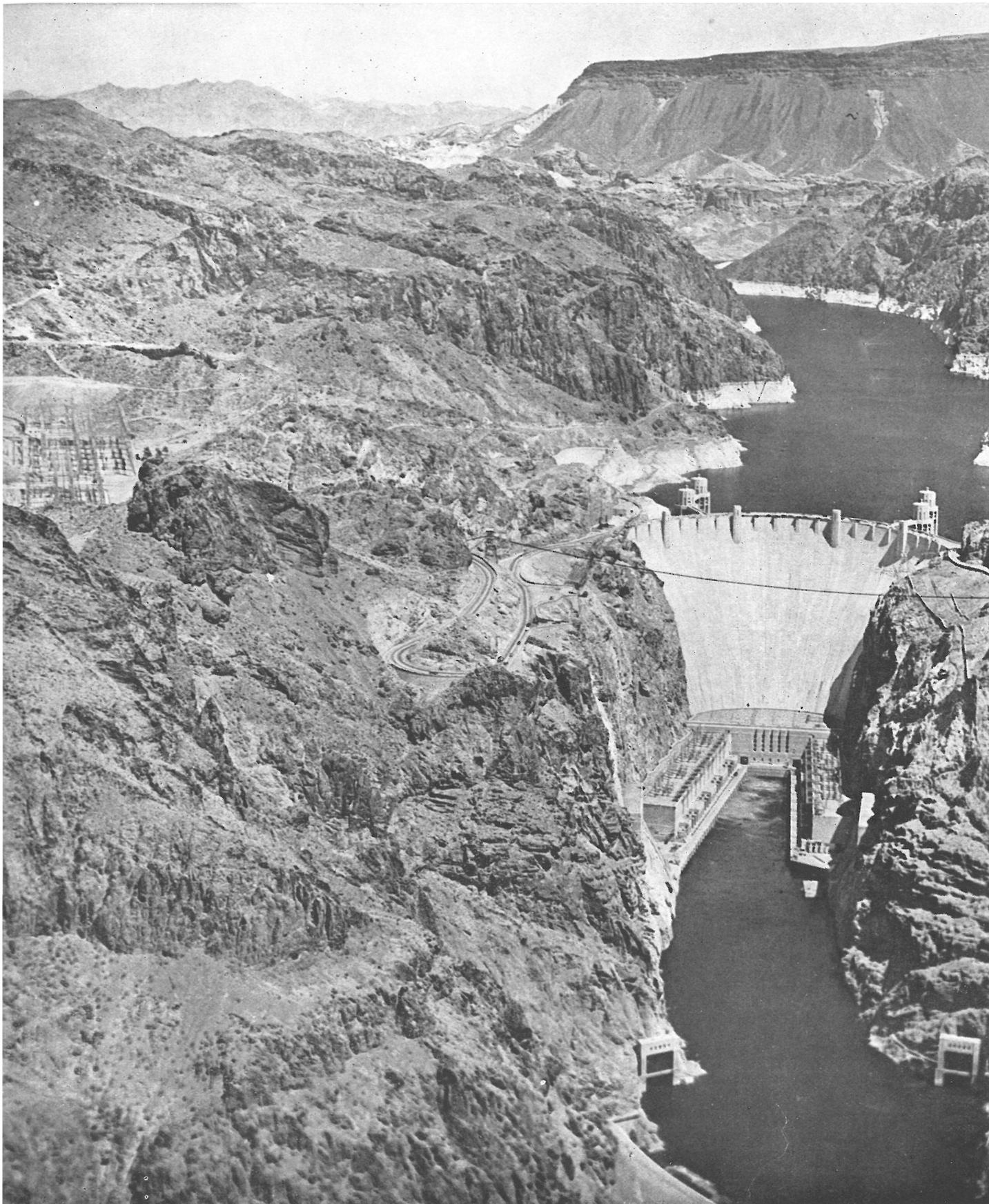
Por tanto, la tracción máxima admitida para los efectos sísmicos es igual, en magnitud, a la carga

media unitaria de la sección, o, lo que es lo mismo,

$$w_c h/20.000 = 34,4 \text{ kg/cm}^2,$$

donde:  $w_c$  = peso del metro cúbico del hormigón (en kilogramos) y  $h$  = altura (en metros).

Este resultado es incompatible con el primer cri-



La presa Hoover embalsa 37.000 millones de m<sup>3</sup>, tiene una capacidad potencial de 1.249.800 kilovatios, 380 m de longitud y se emplearon 3,36 millones de m<sup>3</sup> de hormigón en su construcción.



terio, ya que éste exige que no exista tracción alguna en el paramento de aguas arriba cuando el embalse está lleno y que la subpresión sea el 85 % de la carga hidrostática.

#### **Resistencia del hormigón**

Debe notarse también que, para un hormigón determinado, los proyectistas suizos permiten un 50 % más de carga de trabajo en el material, al tener en cuenta el efecto sísmico, que si se trata de una carga estática. Por ello, si tenemos calculada una carga práctica de 70,31 kg/cm<sup>2</sup>, para el hormigón sometido a una carga estática, este material fué proyectado para una resistencia 4,2 veces mayor, o, lo que es igual, para resistir 295,30 kg/cm<sup>2</sup>. Para una tensión determinada en la que se ha incluido el efecto sísmico en la proporción de 105,46 kilogramos por centímetro cuadrado, el hormigón deberá tener una resistencia 2,8 veces mayor, y que, en este caso concreto, sería de:

$$105,46 \times 2,80 = 295,30 \text{ kg/cm}^2.$$

Alguna diferencia no constituye una novedad, ya que en la práctica americana se permiten tensiones algo más elevadas en estructuras sometidas a cargas no frecuentes y de poca duración que a las cargadas estáticamente, es decir, sometidas al peso propio; pero el 50 % es una diferencia suiza que nos parece excesiva.

Los suizos determinan la resistencia del hormigón valiéndose de probetas cúbicas de 30 cm de arista, ensayadas a los noventa días. Basándose en varios ensayos realizados en los EE. UU., se puede admitir que el 90 % de las resistencias suizas en probetas cúbicas a los noventa días son, aproximadamente, equivalentes a las obtenidas por el Bureau of Reclamation en sus ensayos normales de probetas cilíndricas de 15 × 30 cm al año de vejez. De lo que se deduce que la resistencia máxima que debería admitir el Bureau en proyectos de presas sería de 63,27 kg/cm<sup>2</sup> si se hiciesen los ensayos del hormigón con probetas cúbicas de 0,30 m de arista y a los noventa días. La tensión máxima calculada por Hunerwadel para el pie del paramento de aguas abajo de la presa Grande Dixence es de 130 kg/cm<sup>2</sup>, que representa el doble de la carga actualmente admitida por el Bureau of Reclamation.

#### **Resistencia al deslizamiento**

Ordinariamente, al redactar un proyecto se acostumbra a estudiar y comparar la relación entre fuerzas horizontales y verticales. Esta relación se



La presa Shasta embalsa 5.000 millones de m<sup>3</sup>, tiene una potencia instalada de 379.000 kW y se emplearon unos 4.5 millones de m<sup>3</sup> en su construcción.

proyecta de tal forma que su cociente sea menor al de la tangente del ángulo de rozamiento del material correspondiente.

Para una presa de sección triangular con agua hasta el nivel del vértice superior del triángulo, esta relación es independiente de la altura de la presa. La relación aumenta al tener en cuenta la subpresión, y es aún mayor al considerar las fuerzas horizontales debidas a los efectos sísmicos. La magnitud admitida para las fuerzas debidas al sismo en el momento de proyectar la presa todavía no ha sido dada a conocer; sin embargo, empleando el

método de Westergaard y una aceleración gravimétrica de 0,1, las fuerzas horizontales son mayores que las verticales cuando se incluye la subpresión.

Para evitar que esta relación sea mayor que la equivalente al ángulo de rozamiento al incluir el efecto sísmico, el proyecto de cualquier presa típicamente de gravedad debe estudiarse comparativamente entre secciones triangulares con un paramento vertical en aguas arriba y otras con este paramento inclinado o, simplemente, con pendiente no uniforme, como ocurre con la presa de Shasta.

El peso adicional que proporciona el paramento inclinado y la componente vertical del agua que carga sobre el paramento, mejora la relación que estamos estudiando. Igualmente, el momento de vuelco debido al empuje del agua se halla disminuído con la práctica del paramento inclinado respecto a la vertical.

#### **Fase constructiva**

Los comentarios anteriores sobre la distribución de fuerzas se basan sobre la admisión de una estructura homogénea y monolítica. A este respecto, es interesante notar que se ha propuesto la construcción de la presa de Grande Dixence en dos fases: una, que la lleva a la altura de 178 m, y otra, posterior, a la de 281 metros.

Los bloques no cargados y enfriados a la misma temperatura antes de hormigonar los pasos llave, se pueden considerar como muy aproximados a una estructura monolítica; pero las fases constructivas, tal como se proponen para la presa de Grande Dixence, suponen el empleo del embalse antes de terminar la presa y, por tanto, algunos bloques se hallarán sometidos a una carga parcial de agua antes de construir y rejuntar los bloques adyacentes no cargados, lo que altera el supuesto del monolitismo.

Debido al hecho que la dosificación del cemento variará en distintas partes de las diferentes secciones, con objeto de lograr las resistencias previstas para ellas, el módulo elástico del hormigón también variará, lo que va en contra del supuesto de la homogeneidad de la estructura.

Los métodos propuestos para ajustar las cargas de trabajo durante la fase constructiva de la presa no se han dado a conocer. El único caso conocido de construir presas por recrecimiento discontinuo es el de Marshall Ford Dam. En esta presa la construcción se llevó directamente a unos 62 m de altura; después se recreció hasta los 85 m, aproximadamente, con la adición de un muro tipo losa que se construyó sobre la parte del paramento de aguas arriba y, finalmente, se rejuntó con la obra original. En la presa O'Shaughnessy, de California, estructura tipo gravedad, curva en su proyección horizontal, se recreció, también discontinuamente, añadiéndole un espesor de hormigón sobre la parte del paramento de aguas abajo. Esta adición tenía por objeto, parcialmente, el absorber el empuje del efecto de arco.

Como no existe precedente de elevar una presa de gravedad de 178 m de altura a 281 m, sería in-

terésante conocer los detalles propuestos por los ingenieros suizos sobre la solidarización entre secciones para conseguir una estructura homogénea y monolítica, conocimiento que contribuiría a ampliar los que existen actualmente sobre presas de gravedad de gran altura.

#### **Los ingenieros suizos contestan**

El ingeniero suizo Hunerwadel se ha expresado, después de leer este trabajo, en los términos siguientes:

«Se puede hacer una comparación entre las diferentes presas de gravedad de gran altura construídas en los Estados Unidos y en Suiza, pero habrá de tomarse en consideración las secciones transversales de los valles, ya que pueden influir considerablemente en las decisiones de liberación en la redacción del proyecto.»

«El valle cerrado por la presa Shasta es abierto, mientras que el de la Grande Dixence es muy angosto, pues tiene forma de V. Este hecho no se ha hecho notar claramente en la descripción del proyecto para la construcción de la presa de Grande Dixence, pero ha permitido grandemente cierta liberación en el proyecto.»

«Se puede añadir que las condiciones impuestas por el Gobierno suizo contienen un valor específico para la presa de Grande Dixence, y no se pueden aplicar, como una regla general, a todos los proyectos de presas suizas.»

«Este aprovechamiento hidroeléctrico se realiza por empresas privadas y no por el Gobierno.»

«Si se han hecho algunas liberaciones en el proyecto de Grande Dixence, éstas se han incluído en el segundo criterio, el que dice que, con efecto sísmico y embalse lleno, la resultante de todas las fuerzas debidas al peso de la presa, del agua y subpresión, se mantendrá dentro de los dos tercios centrales de cada sección horizontal.»

«En lo que respecta al período constructivo proyectado para la realización de la presa Grande Dixence, se redactó una memoria en la que se daban los detalles de solidarización entre partes para conseguir una estructura homogénea y monolítica, documento que se presentó al último Congreso Internacional de Grandes Presas, celebrado en París el año 1955.»

Esta memoria, designada con la notación C-34, se puede obtener de la Comisión Internacional de

Grandes Presas, calle Saint-Lazare, París (9), Francia.

Este informe se ha redactado en francés, y entre otras cosas se lee:

Los métodos adoptados prevén la construcción de una primera fase de 181 m de altura y un paramento de aguas abajo terminado en redientes o escalones.

La segunda fase se eleva por la adición de bloques o columnas sobre estos escalones.

Cada fase sucesiva se construirá de la misma forma.

Los espacios libres entre bloques son necesarios para permitir la obra en elevación, aun cuando varíe el nivel del agua.

Estos espacios libres, sólo se cerrarán cuando el embalse esté vacío, para evitar una reducción de compresión en el paramento de aguas arriba.

Para fijar el número y posición más favorable de estos espacios libres, se realizaron ensayos fotoelásticos y de deformación sobre modelo reducido.

Su efecto sobre la distribución de deformaciones fué también objeto de estudio.

Otros ensayos se han dirigido hacia la comprobación de la influencia del escalonado del paramento de aguas abajo.

Los espacios libres permiten a los bloques una contracción y enfriamiento más favorable.

Los paramentos verticales del escalonado no debían ser lisos, sino formando redientes.

Los redientes tienen la finalidad de asegurar una buena transmisión de las deformaciones entre las diferentes fases de la construcción.

La forma de estos cuerpos con redientes se estudiaron sobre modelo reducido, y tienen sus caras inclinadas formando ángulos del 75 al 120 %. Son aproximadamente paralelos a las direcciones de las deformaciones principales.

Después de hormigonar los espacios libres entre bloques, se rejuntarán con mortero inyectado a baja presión.

*J. J. U.*

Fotos: Bureau of Reclamation de Denver, Colorado

