

CUENCOS AMORTIGUADORES DE ENERGIA EN PRESAS- VERTEDERO DE ACUSADA CURVATURA EN PLANTA

Por FRANCISCO ZAPATA TEJEDOR, Ingeniero de Caminos.

Presenta el autor una detallada descripción del estudio en modelo reducido del problema que se reseña en el título, para el caso de la presa de San Esteban sobre el río Sil, llegando a interesantes conclusiones y prometiendo volver a insistir en otra ocasión sobre este tema, de gran interés hidráulico.

El problema de energía cinética en el pie de caída hizo que, antes del año 1928, se fuera sistemáticamente a la solución por aliviaderos de superficie o túneles a presión en muchas presas importantes, tanto en España como en el extranjero; hoy en día, con el conocimiento que se tiene del fenómeno del resalto y el avance en la técnica de los modelos reducidos, hubieran sido presas-vertedero en gran parte, con más economía en su construcción.

En el año 1928, los americanos empezaron a adoptar la solución vertedero en presas de importante altura, tales como la de Willwood y Bull Run, con excesiva longitud de solera, por seguir la tendencia, al dimensionarla, de las proyectadas en presa de derivación de pequeña altura. Posteriormente, la presa de Conowingo, con solera más corta y curvada, marcó ya un tipo, que quince años más tarde fué mejorado y modificado en las presas de Grand Coulee y Madden. Estas dos presas son las que realmente han marcado dos tipos de soleras amortiguadoras dentro de la tendencia americana, tanto por su diferenciación en la forma como en el funcionamiento hidráulico. Dentro de la modalidad europea, existen dos tipos acusados de cuencos amortiguadores en las soleras proyectadas en las presas de Dnieprostroi (Rusia) y Las Conchas (España), donde ya se valora el efecto amortiguador del remolino de fondo y se emplea el dispositivo de lanzamiento — en diferentes anegamientos — para aquellos caudales en que la característica del tramo de aguas abajo no es conjugada con la variación de niveles estrictos de resalto.

En consecuencia, los tipos Grand Coulee, Madden, Dnieprostroi y Las Conchas, por su originalidad en la forma de solera y por su definido funcionamiento hidráulico, servirán de precedente para proyectar una presa-vertedero en planta recta y de importante altura, al ser prototipos de cuatro soluciones en las que, en términos generales, se encaja, con las consiguientes modificaciones del caso, el problema particular de amortiguación que se presente. Hacemos constar, con reiteración, que las cuatro soluciones indicadas que juzgamos prototipos se refieren a presas de importante altura, ya que las de menor altura tienen unas características hidráulicas en el pie muy diferentes, aparte

de la consideración del terreno a efecto de socavaciones, siempre a considerar en general en éstas, por ser menos exigentes las condiciones geológicas de la cerrada. No obstante la diversidad de soluciones de soleras que se han adoptado, existe la posibilidad de hacer un estudio diferencial en su funcionamiento hidráulico que catalogue en grupos los diversos cuencos proyectados y fije normas para encajar cada solución en uno de ellos, al conjugar las tres variables que hay que considerar en el problema de amortiguación: velocidad media en el pie, concentración de caudal en el mismo y curva característica del cauce inmediato al cuenco. Este es un tema muy sugestivo, que merece una gran extensión, y sobre el cual volveremos en estas mismas páginas en otra ocasión.

* * *

El problema de las presas-vertedero de planta recta tiene antecedentes y experiencias que permiten ir a soluciones de completa garantía en la evacuación de grandes riadas. No ocurre igual en el caso de presas-vertedero con acusada curvatura en planta, pues en todas las monografías y datos de recientes proyectos sólo se encuentran soluciones muy particulares que no sirven de precedente para el problema general de amortiguación en ese tipo de presas. Concretamente, a nosotros se nos ha presentado este caso en el proyecto de la presa de San Esteban, sobre el río Sil, en que colaboró el que suscribe con los distinguidos compañeros Francisco Fernández Conde y Santiago Corral. Las características de la presa de San Esteban son las siguientes: altura de presa, 110 m.; caudal máximo a evacuar en riadas, 4 500 m.³/seg.; concentración del caudal mínima en el pie para un volumen de excavaciones prudente en el cuenco, 69,2 m.³/seg. por metro lineal y cerrada angosta en cañón con forma de V, de laderas abruptas. Es un caso que, para una presa de gravedad de planta recta, la curva característica del tramo de aguas abajo aconsejaba ir a decidir sobre soleras tipo Grand Coulee o Madden. Las magníficas condiciones de la cerrada, tanto geológicas como topográficas, de las laderas, permiten encajar muy favorablemente una presa arco-gravedad con radio de

120 m. en el paramento de aguas arriba, y con gran reducción en volumen de hormigón frente a la solución gravedad. En consecuencia, se nos presentó un problema nuevo, tanto por la envergadura de la obra como por la cuantía del caudal a evacuar: el acoplar la solución estructural óptima de presa con la más favorable para la evacuación de riadas; es decir, al estudiar una presa-vertedero tipo arco-gravedad, de 110 m. de altura y un radio en el paramento de aguas arriba de 120 m.

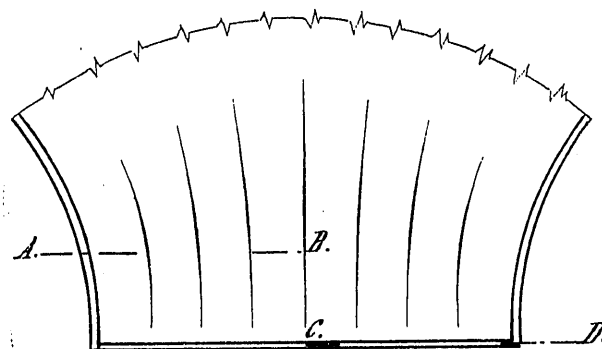
La presa se calculó por el método de Tölke, conforme se desarrolla en su obra *Wasserkraftanlagen*, por considerarlo más racional que el método de las cargas de prueba o "triald load", y se adoptó como talud del paramento de aguas abajo 0,576. El espesor de lámina ventiente es función de la forma en planta de la presa, del caudal a evacuar, del ancho que el volumen de excavaciones obliga en el cuenco y del tipo de compuertas más conveniente. Los correspondientes tanteos nos decidieron a adoptar una altura de lámina de 7 m., con 128 m. de longitud útil de umbral, estando el dispositivo de desagüe constituido por ocho compuertas Stoney de 16×7 m. y pilas de 3,50 m. de anchura, lo cual supone una longitud total de 156 m. entre cajeros extremos del vertedero. Esta elección de altura de lámina, que fué contrastada favorablemente en modelos reducidos, nos comprobó los resultados experimentales de Camp y Howe en vertederos circulares y recogidas en *Engineering for Dams*, de Creager y Justin (edición 1945, tomo I, pág. 230), de que el coeficiente de desagüe es función de la relación entre la altura de lámina y el radio del paramento de aguas arriba, decreciendo a medida que dicha relación aumenta, y siendo ésta $\frac{7}{120} = 0,058$, se puede adoptar

idéntico coeficiente de desagüe que en un vertedero lineal; la experiencia en modelo reducido nos lo demostró, pudiéndose tomar para la máxima lámina un coeficiente de 2,04, aunque en el cálculo previo se consideró 1,90 para tener un margen de seguridad.

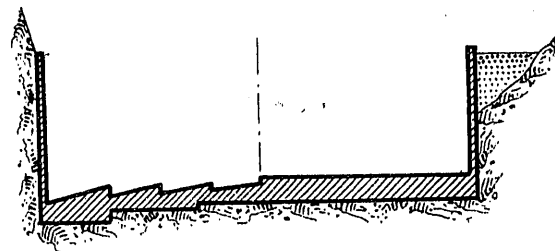
Una vez adoptado el vertedero que ligeramente hemos descrito, el problema se centra en el estudio de solera y cuenco amortiguador. Al seguir los filetes líquidos la línea de máxima pendiente, lo hacen según las generatrices del tronco de cono que forma el paramento del vertedero, y, en consecuencia, existe un efecto de convergencia o concentración de filetes en el pie de presa, anulando las condiciones hidráulicas de régimen precisas para una amortiguación por resalto. Este fenómeno intuitivo fué comprobado en un modelo a escala 1:500, hecho del vertedero, formándose en los diferentes vertidos una intumescencia en el centro de la solera y alargada en el sentido longitudinal, que era la vena resultante de la composición de los filetes por el efecto de convergencia y produciéndose a ambos lados de ella remolinos de eje vertical, aparte del efecto de impacto que la vena ejercía en el fondo del cauce.

Esto ocurría con cualquier tipo de solera de las empleadas en presas de planta recta que se adaptara a este caso.

En consecuencia, se precisaba estudiar un nuevo tipo de solera, distinta en su forma y disposición de los prototipos que enumeramos anteriormente. Es evidente que la nueva solera debe cumplir una condición más que las corrientes: debe romper el efecto de convergencia de los filetes, dirigiendo y curvando a éstos para tener en el borde una distribución bastante uniforme de velocidades y quedar reducido el problema a un estudio en condiciones normales de resalto.



Planta



Sección A-B-C-D

Fig. 1.ª — Solera aperaltada en dientes.

Como es natural, para actuar sobre los filetes, teniendo en cuenta la rigidez que tienen en corriente rápida, no hay otra forma que modificar las líneas de máxima pendiente en el acuerdo del paramento del vertedero con la solera, las cuales constituyan una superficie en la que cada filete se adapte siguiendo un perfil alabeado de acuerdo con la velocidad y el efecto de fuerza centrífuga que ejerce sobre aquél por la curvatura. Teóricamente, el problema es imposible de abordar y no hay más recursos que el estudio en modelo reducido.

En los primeros tanteos construimos un modelo tridimensional, a escala 1:500, el cual nos fué fundamental para fijar la forma de la solera y partir de una solución que se mejoró posteriormente en el modelo

a escala 1:100. Partimos, en primer lugar, de considerar la solera que se describe en principio teóricamente: la constituida por dos superficies alabeadas simétricas que se cortan, constituyendo una arista según el eje del cuenco, que acuerden hidrodinámica-

recia la obra, por exigir un volumen de fábrica muy superior al que se emplea en las soleras normales.

Entonces abordamos el problema partiendo de la base de escalonar los peraltes transversales. Para ello consideramos la lámina vertiente dividida en ocho

ENSAYO Nº 2

Caudal $1.500 \text{ m}^3/\text{seg.}$

*Las cuatro compuertas extremas abiertas.
Sección por el centro del vertedero.*

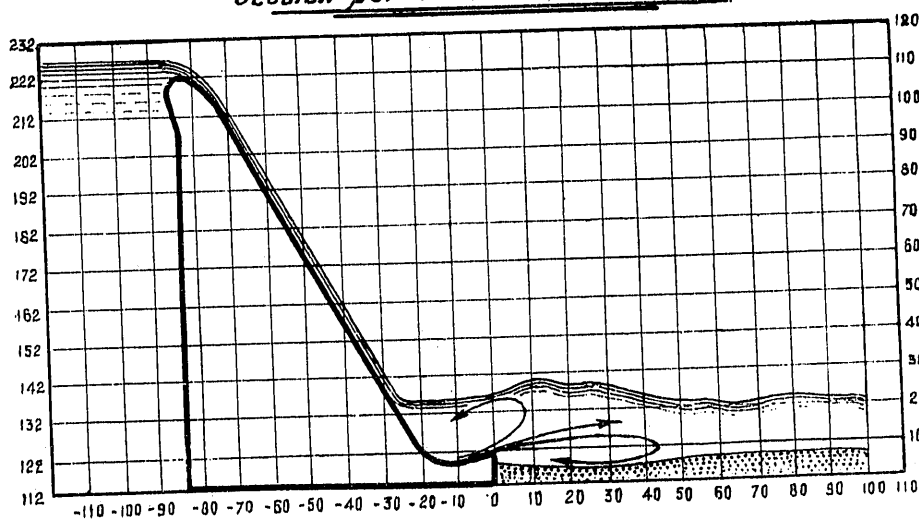
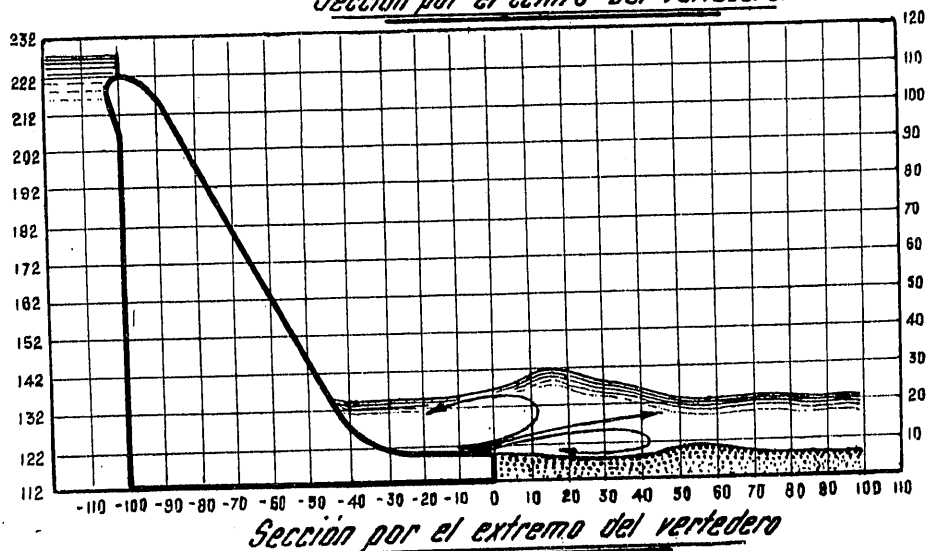


Fig. 2.ª — Perfiles de la lámina vertiente, del resalto y de socavación, obtenidos en el modelo para el caudal de $1.500 \text{ m}^3/\text{seg.}$, vertiendo por cuatro vanos, dos a dos simétricos.

mente con el paramento del vertedero, y cuyas secciones transversales son unas curvas que actúan sobre los filetes como un perfil de peralte. El funcionamiento hidráulico no fué muy satisfactorio y, constructivamente, la solución ofrecía grandes dificultades y enca-

laminas parciales, dos a dos simétricas, correspondiendo con los vanos de compuertas, y constituimos ocho escalones en la solera, de forma que el peralte de cada uno fuera función del ángulo que cada eje de los vanos forma con el del cuenco. De esta forma, las

semisecciones transversales de la solera tienen unos perfiles con forma en "dientes de sierra" y en variaciones progresivas, para que en el borde de la solera resultara una horizontal. Después de muchos tanteos sobre el modelo, construyendo diversidad de tipos de

borde de aquélla era uniforme. En consecuencia, el problema quedaba resuelto y reducido a un estudio de amortiguación por resalto. En la figura 1.^a se indica la disposición de la solera, a la que denominaremos "solera aperaltada en dientes".

ENSAYO N.º 3

Caudal 2.250 m³/seg. Las cuatro compuertas extremas abiertas.
Sección por el centro del vertedero.

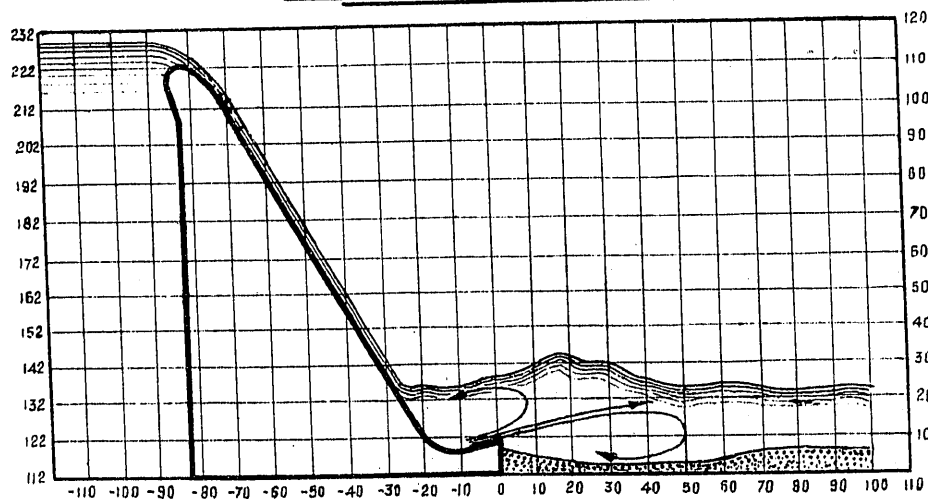
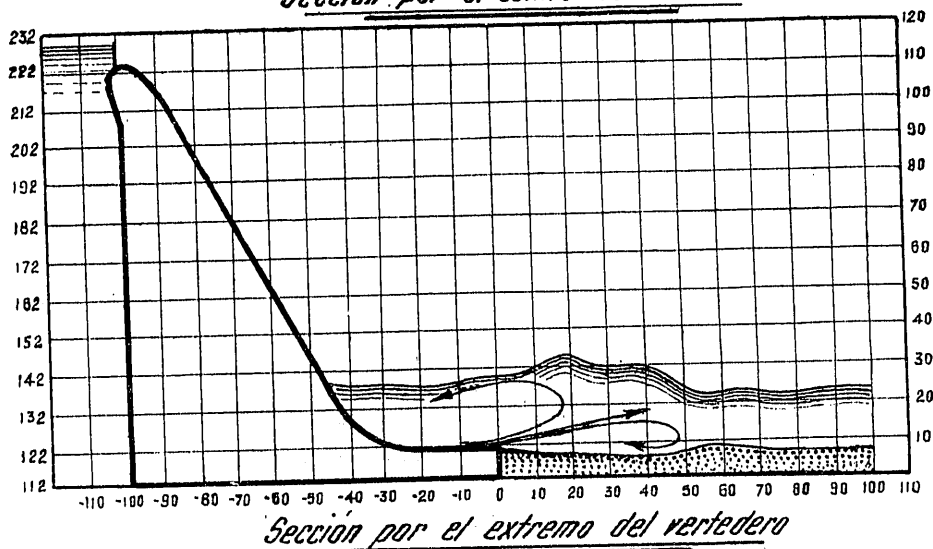


Fig. 3.^a — Perfiles de la lámina vertical, del resalto y de socavación, obtenidos en el modelo para el caudal de 2.250 m³/seg., vertiendo por cuatro vanos, dos a dos simétricos.

dientes, llegamos a dar con la solución óptima, la cual se acusó en el funcionamiento hidráulico del modelo, cuando trabajando en éste con lanzamiento de la lámina desde la solera, se observó que se había roto el efecto de convergencia y la distribución de filetes en el

Teniendo resuelto el "efecto de convergencia", el estudio de resalto se hace como si fuera un vertido bidimensional. En consecuencia, partimos en el estudio teórico de las consideraciones de Moore (*Proceedings Am. Soc. C. E.*, noviembre 1941), sobre la dependen-

cia del coeficiente de velocidad respecto a la relación entre la altura del umbral del vertedero y la de la lámina de agua, con lo cual fijamos la velocidad media en el pie de presa y siguiendo las fórmulas dadas por Backshmeteff (*Hidraulics of open channels*, pág. 240),

laterales del cuenco y los del vertedero no se hacía según una transición suave y, por tanto, una corriente rápida con la rigidez que tienen los filetes no se adaptaba lateralmente a los muros-guía. Estas consideraciones, y por otra parte la necesidad de sobreanchos

ENSAYO Nº 5

Caudal 3.000 m³/seg.

*Las ocho compuertas abiertas.
Sección por el centro del vertedero.*

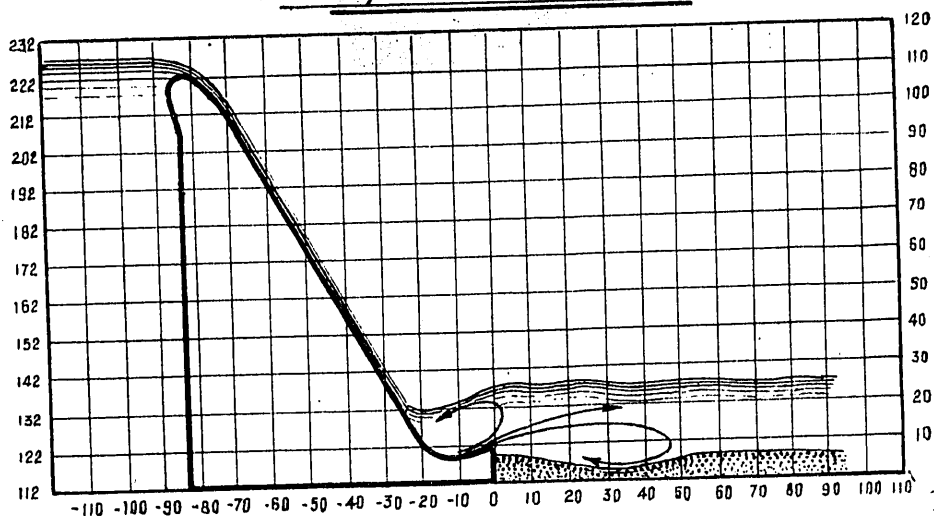
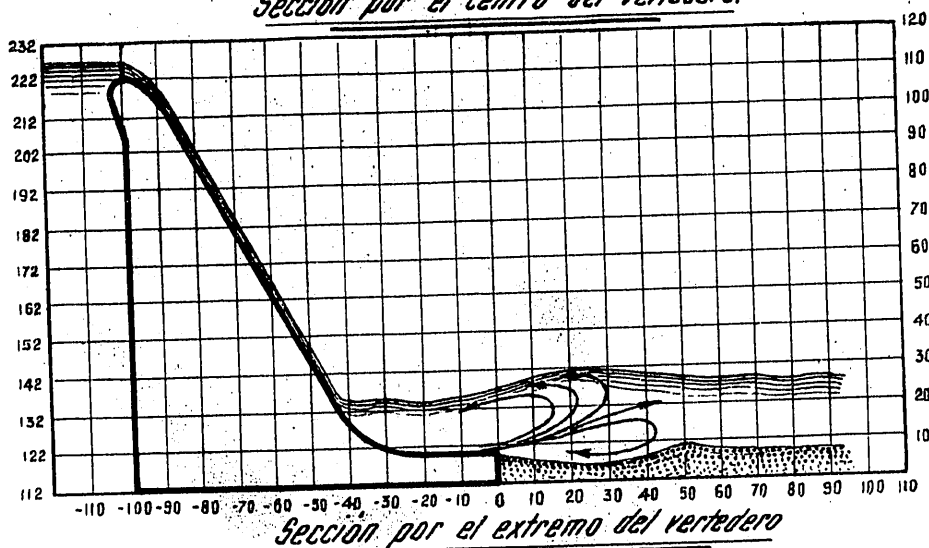


Fig. 4.^a — Perfiles de la lámina vertiente, del resalto y de socavación, obtenidos en el modelo para el caudal de 3.000 m³/seg., vertiendo por los ocho vanos.

determinamos las alturas conjugadas para el resalto estricto, resultando que con un ancho en el cuenco de 55 m. se formaba el resalto para caudales superiores a los 700 m³/seg. Comprobada esta anchura en el modelo, se observó que el acuerdo entre los muros

en los dientes extremos, que son los más peraltados, nos llevaron, en los tanteos sobre el modelo, a adoptar como ancho más conveniente del cuenco 65 m., y lo justifica también la comparación con otras grandes presas-vertederos. En efecto: lo que define hidráulica-

mente a un vertedero y a un cuenco amortiguador es la concentración de caudal vertiente por metro lineal, resultando en nuestro caso, para el caudal máximo de 4 500 m.³/seg., una concentración en el cuenco de 69,2 m.³/seg. por metro lineal, y en las presas de Shasta, Grand Coulee y Dnieprostroi, las concentraciones respectivas son de 48, 57 y 61 m.³/seg. por metro

para la estabilidad del cuenco. El problema se complica aún más cuando el vertido se hace en parte de los vanos, que es el caso frecuente en estas instalaciones, por existir una distribución desigual de velocidades, que es lo que provoca la formación de remolinos de eje vertical.

La solera estudiada, y que funcionó perfectamente,

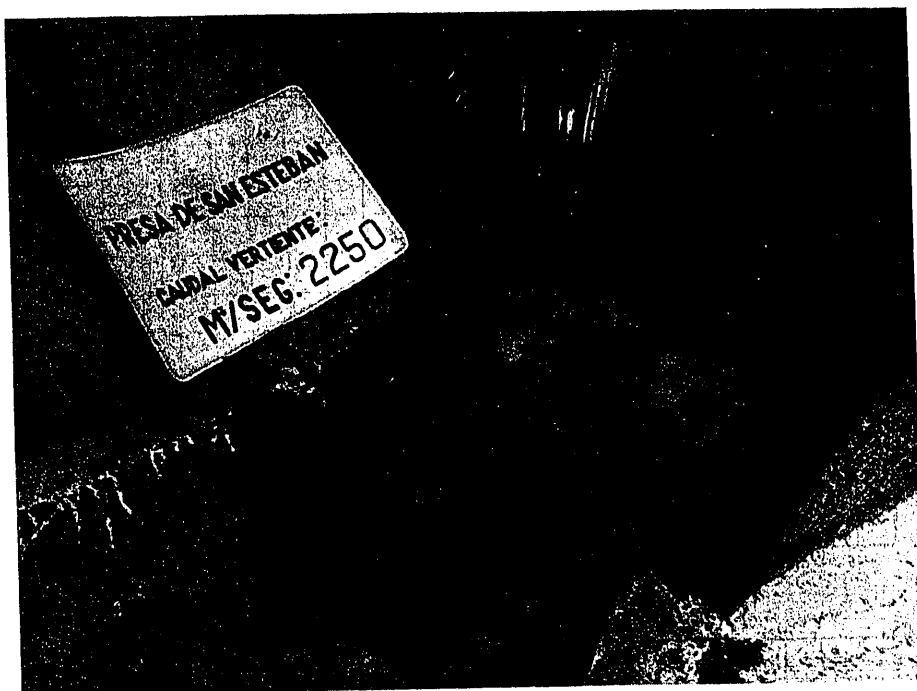


Fig. 5.ª — Vista del cuenco amortiguador vertiendo por las cuatro compuertas extremas, dos a dos simétricas. Puede observarse la perfección del resalto y la uniformidad de la cresta que constituye el borde del remolino principal de superficie.

lineal y, por tanto, aunque rebasados los anteriores valores ligeramente, quedamos dentro de un límite que permite un adecuado funcionamiento hidráulico y justifica el ancho adoptado, teniendo en cuenta las características topográficas de la cerrada.

Después de los tanteos realizados en el modelo a escala 1:500 y del estudio teórico de amortiguación, se pasó a comprobar experimentalmente los resultados en modelo a escala 1:100. Se realizó toda una serie de ensayos, recogiendo todas las diversas aperturas de compuertas que pueden presentarse en la práctica. Es muy corriente que un cuenco amortiguador funcione perfectamente para el caudal de máxima riada y caiga en defecto — aun supuesto un vertido simétrico — para caudales inferiores, bien por un anegamiento del resalto que provoca un aumento en la corriente de fondo, o por estar trabajando en el límite crítico lanzamiento-resalto, con remolinos alternativos peligrosos

tiene su borde en línea recta normal al eje longitudinal del vertedero, y dada la planta en curva de la presa, la longitud de ella es variable, siendo máxima en la sección central, con 39,90 m. de longitud, y mínima en las secciones extremas, con 21 m. de longitud. Tiene un ancho en su borde de 65 m. y lateralmente está limitada por las superficies cilíndricas de planta parabólica, que acuerda con los muros-guías laterales del vertedero. La solera, en el sentido transversal, tiene ocho dientes aperlaltados y simétricos. En cada arista que limita dos dientes, existen dos perfiles de solera: el superior, para constituir el saliente de uno de los dientes, y el inferior, para formar el entrante del contiguo, y con ello la constitución de los dientes queda clara, ya que la superficie de ellos es un conoide, obtenido apoyando horizontales en la arista superior de un nervio y en la inferior del contiguo.

En las figuras 2.ª, 3.ª y 4.ª, indicamos los perfiles

de socavación que se obtuvieron en algunos ensayos de comprobación de estabilidad en el lecho de arena establecido en el cuenco. Los resultados fueron favorables, no sólo por la reducida socavación, sino porque se comprobó la estabilidad del remolino de fondo.

La descripción detallada de cada uno de los ensayos realizados alargarían en extremo estas notas, y prefe-

el lineal en vertidos parciales por vanos simétricos, resultando un funcionamiento por resalto, con ausencia de remolinos de eje vertical, como hemos podido comprobar vertiendo por dos, cuatro y seis vanos.

4.ª Es fundamental para el buen funcionamiento hidráulico fijar convenientemente, por ensayos, la longitud del cuenco a partir del borde de solera, y estu-

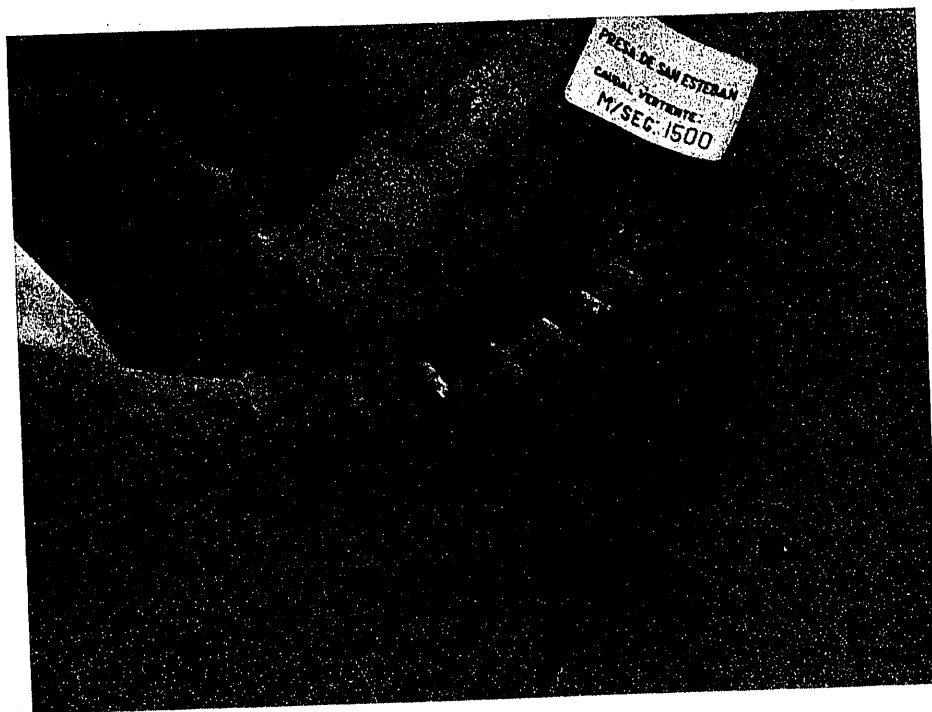


Fig. 6.ª — Vista desde aguas arriba del modelo, vertiendo por cuatro compuertas extremas.

nimos volver a insistir en otra ocasión, ya que las consecuencias deducidas son de gran interés para el proyecto de soleras amortiguadoras en presas de planta curva.

Como conclusiones derivadas de dichos ensayos, podemos sentar las siguientes:

1.ª Cuando la relación entre la altura de lámina y el radio de la presa es inferior a 0,10, la capacidad de desagüe del vertedero curvo es equivalente al lineal, pudiéndose adoptar como coeficiente de desagüe 2,04 si el perfil del umbral es hidrodinámico (perfiles Prasil, Creager, etc.).

2.ª Con la "solera aperlada en dientes" se rompe la convergencia de los filetes, lográndose una distribución uniforme de velocidades en el borde de solera que permiten la formación del remolino principal de superficie y el de fondo, típicos en un funcionamiento por resalto.

3.ª El vertedero circular se comporta mejor que

diar los perfiles de transición entre el cuenco y el cauce de aguas abajo.

* * *

Con este nuevo tipo de solera, el problema de amortiguación en vertederos curvos queda reducido al caso de lineales. Teniendo en cuenta el factor de convergencia, se calcula la concentración de caudal en el pie por metro lineal; se parte de un vertido bidimensional con esa concentración y se estudia la formación del resalto, considerando la curva característica del cauce. De esta comparación se deduce la forma más conveniente de solera para vertedero recto, y a ella se inscriben los dientes aperlados. De esta forma se tiene un tipo de solera, como base de partida, para comprobar y perfeccionar en el modelo tridimensional. La variabilidad del factor de convergencia se contrarresta con la variabilidad en el número de dientes, es

decir, los peraltes de los dientes y el número de éstos son las incógnitas en cada caso particular.

En los últimos veinticinco años, la tendencia general de los proyectistas ha sido hacia presas-vertedero

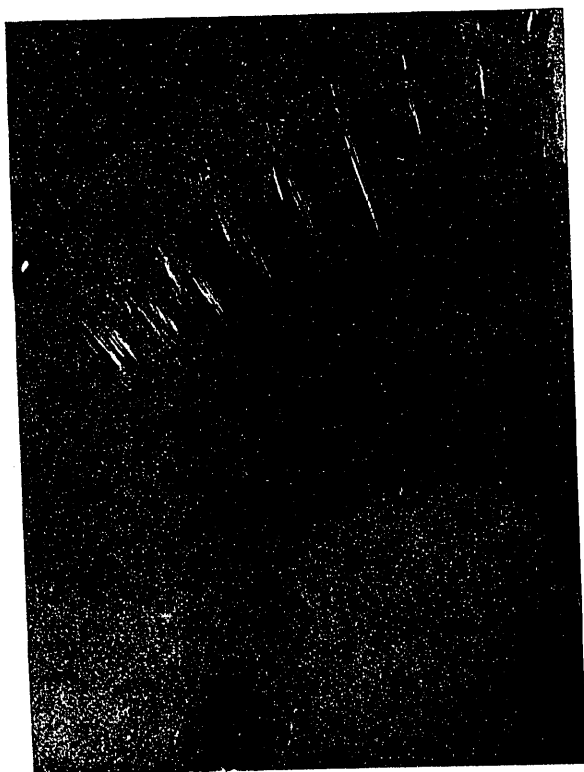


Fig. 7.^a — Vista del paramento-vertedero y del cuenco amortiguador para el caudal máximo de 4.500 m.³/seg.

para resolver la evacuación de riadas. Ultimamente en América se está volviendo a considerar los aliviaderos en túneles en recientes proyectos de aprovechamientos hidráulicos, por haberse observado en las soleras de varias presas fenómenos de socavación y cuarteamiento apreciables. Ello ha sido debido a efectos mecánicos de desgaste en la fábrica, al actuar sobre la solera a manera de "fresa" los productos del cauce que fueron lanzados a aquélla por los remolinos de eje oblicuo resultantes de componer el principal de fondo con los verticales que se forman en los vertidos parciales. En consecuencia, lo que ha caído en defecto en algunos casos no es el funcionamiento hidráulico, sino la fábrica de la solera; el problema es de calidad, con resistencia al desgaste y gran cohesión, para prevenir la vibración rítmica que produce la lámina de agua al pasar con velocidad media prácticamente constante.

La solución de presa-vertedero sigue siendo la más racional por ser la que menos modificación produce — creación de un gran rápido — en el equilibrio logrado, a través de los siglos, entre el cauce y el río. Por tanto, hemos creído de interés dar a conocer este nuevo tipo de solera, adaptable a presas de planta curva, tanto con perfil de gravedad o con perfil triangular reducido cuando trabaje estructuralmente como arco-gravedad. El funcionamiento de esta solera sólo está avalada por ensayos en modelo reducido. La experimentación hidráulica merece fe; está comprobada no solamente para la comparación y elección de soluciones en el modelo, sino también para la interpretación de resultados obtenidos en aquél; de esa fe participamos todos los que hemos visto trabajar un modelo, y más tarde observamos en la realidad el funcionamiento de la obra en la que aquél fué el embrión.