

ENSAYOS CON SOLERAS DE RESALTO

Por JOSÉ ANTONIO GARCÍA-DIEGO Y ORTIZ, Ingeniero de Caminos.

Expone el autor los ensayos llevados a cabo en el Laboratorio de Obras Hidráulicas de la Escuela de Caminos en modelos de dos grandes obras en construcción, que aportan experiencia sobre el importante asunto de protección del terreno al pie de los vertederos, en lo que cabe esperar sucesivos perfeccionamientos, a los que, indudablemente, habrán de contribuir la exposición de las soluciones adoptadas en las distintas obras.

Durante el año 1946 he trabajado, bajo la dirección del Profesor Aguila, en dos de las series de ensayos en modelos reducidos del Laboratorio de Obras Hidráulicas de la Escuela de Caminos.

Este artículo es una reseña de los ensayos y un intento de fijar algunas normas prácticas para el proyecto de dispositivos amortiguadores de la energía del agua al pie de los azudes. Se refiere a dos obras, hoy en construcción, de características esencialmente distintas, y aunque las soluciones propuestas se fundan en los conocidos principios del resalto hidráulico, creo pueden ser de alguna utilidad para que los que trabajan en los laboratorios de Hidráulica españoles, puedan compararlas con las por ellos ideadas. Además, si la bibliografía extranjera sobre estas cuestiones — por lo menos la que puede fácilmente consultarse — no es muy abundante, la española lo es aún menos, a pesar de que la boga actual de las presas-vertedero ha hecho se les dedique alguna atención, habiéndose ensayado con éxito varios dispositivos originales.

Presa de Montijo.

Esta obra, en construcción por la Delegación de los Servicios Hidráulicos del Guadiana y Cijara, consta de un tramo de vertedero fijo y de nueve compuertas, de ellas tres automáticas y siete Stoney (tres de $8 \times 5,10$ y cuatro de $6 \times 3,6$), con sus umbrales a poca altura sobre el cauce del río.

Nuestra primera labor fué la de comprobar, por medio de aforos, la exactitud de los valores calculados para el desagüe con diversas hipótesis de altura de embalse y apertura de compuertas.

Resumimos a continuación las fórmulas empleadas. Son generalmente conocidas de los proyectistas de Hidráulica, pero las damos, a pesar de ello, porque no las hemos visto citadas juntas, aunque resuelven los casos más corrientes de desagüe sobre vertederos, y además, por haber sido necesario corregir a veces los valores supuestos en proyectos, particularmente en los casos b) y c).

a) *Perfil Creager y vertido libre sobre la coronación.*—Puede aplicarse con buena aproximación la va-

riación del coeficiente C de la fórmula $q_u = C \cdot h^{3/2}$ en función de la relación entre la carga de agua estu- diada en cada caso y aquella para la cual fué dibujado el perfil Creager (*). Se representa en la figura 1.^a

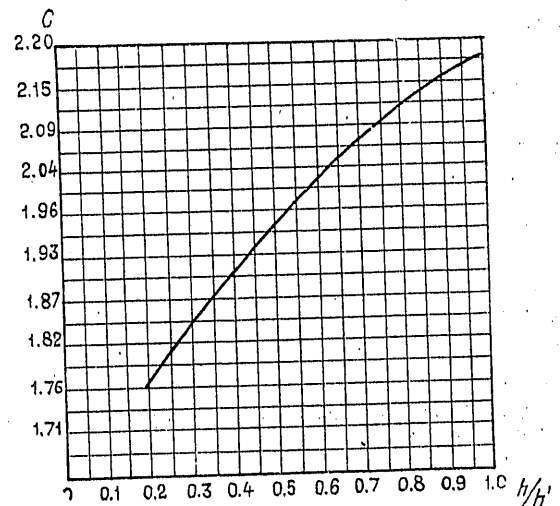


Figura 1.^a

b) *Desagüe bajo una compuerta Stoney.*—La fórmula que nos da el caudal unitario es:

$$q_u = p \varphi \sqrt{2g(H_0 - p)}$$

en la que p es la profundidad de lámina a la salida de la compuerta; H_0 , la carga total de agua, y φ , un coeficiente igual a la unidad en los casos normales. Su empleo se simplifica si tenemos en cuenta que p puede deducirse multiplicando la abertura S de la compuerta por un coeficiente que, si suponemos está fija y la carga de agua amentando a partir de cero, pasa rápidamente de la unidad a un valor comprendido entre 0,63 y 0,66; pudiéndose tomar con buena aproximación 0,645 en todos los casos (**).

(*) Creager & Justin, *Hidroelectric handbook*, y Gómez Navarro-Aracil, *Salto de Agua*, pág. 51.

(**) Th. Rehbock: "Die Verhütung schädlicher Kolke bei Sturzbetten". Separata del *Bauingenieur*, 1928, pág. 19.

El ábaco de la figura 2.^a permite obtener el caudal unitario en función de H_0 y S .

Vertido libre sobre presa de coronación ancha.

Este caso se presenta a menudo en los azudes de poca altura, en los que la aplicación del perfil Creager daría tensiones excesivamente grandes, substituyéndose por una sección trapecial más robusta. En los ensayos de la Presa de Montijo hemos comprobado para este caso la fórmula

$$C = 1,80 \left(\frac{k}{K} \right)^{0,2};$$

siendo h la carga total de agua y K la anchura de la coronación, y que representamos en la figura 3.^a (*).

Como en la reseña de estos ensayos vamos a referirnos varias veces al dispositivo para mitigar la socavación, conocido como "solera corta con bordillo triangular", daremos algunas indicaciones sobre su empleo y manera de proyectarlo. Los principios en que se funda esta solera de resalto y los resultados de los ensayos realizados para la Presa de Rosarito, han sido expuestos por su autor en esta REVISTA (**). Pero la experiencia ulterior, basada en los varios azudes estudiados en el Laboratorio de la Escuela, y en los que este dispositivo ha sido empleado con éxito, le llevaron a introducir algunas alteraciones de forma que mejoran su rendimiento.

(*) A. Schoklitsch: *Arquitectura Hidráulica*, I, pág. 113.

(**) A. del Aguila: "Soleras cortas con bordillo triangular", R. O. P., 1-11-1941.

La figura 4.^a muestra un corte de esta solera. La cota del fondo es la necesaria para la formación del resalto, calculada por la fórmula clásica con un coeficiente de anegamiento, que suele bastar sea 1,1 (*). Esta profundidad se logrará, o bien excavando o co-

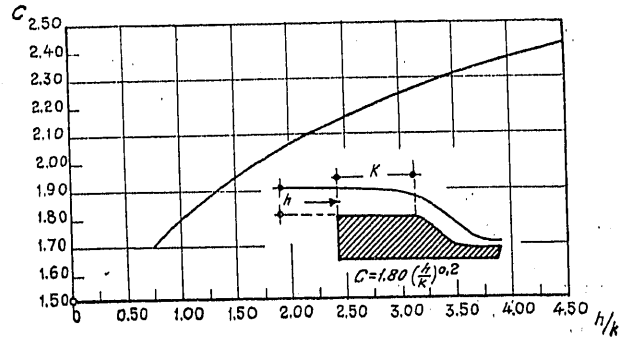


Figura 3.^a

locando un pequeño azud agua abajo; sistema este último generalmente más caro, aunque más perfecto.

La longitud AC , será el 30 por 100 de la calculada de resalto (**), aunque cuando sea bueno el te-

(*) Existe un método moderno de dimensionamiento que, según su autor, conduce a resultados más económicos. (G. Nebbia: "Su i dissipatori a salto de Bidone", *Energia Elettrica*, julio y agosto 1941). No conocemos más que un caso en que se haya aplicado en España, en los azudes proyectados para la Canalización del Manzanares.

(**) Existen para ello varias fórmulas aceptables. La que solemos emplear es $L = \frac{2 q H}{V p_1}$, siendo p_1 la profundidad de lámina antes de producirse el resalto.

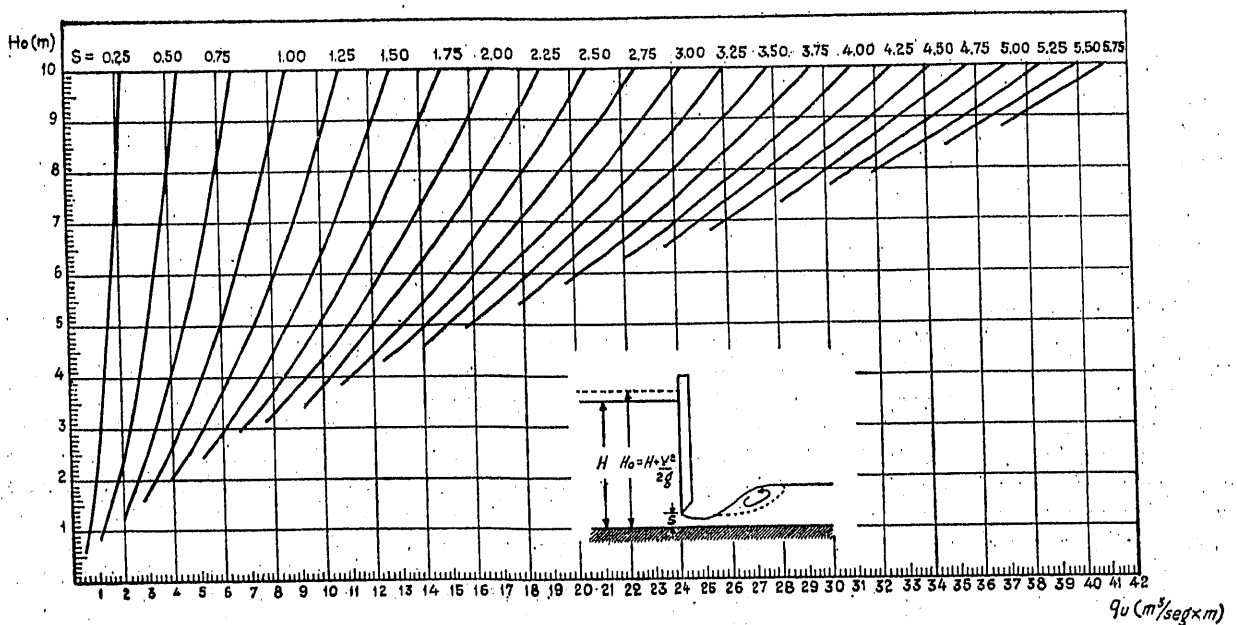


Figura 2.^a

q_u (m³/seg x m)

rreno del cauce y no excesivo el desagüe unitario, es conveniente ensayar soluciones aun menores.

Partiendo del valor citado de AC , por sencillas consideraciones geométricas, se deduce de la figura:

$$R = BD(5 + 2\sqrt{5}) \text{ y } BD = \frac{0,6 q_u}{(3 + \sqrt{5})\sqrt{p_1}} = \frac{0,114 q_u}{\sqrt{p_1}}$$

Sin embargo, la altura de bordillo más apropiada es conveniente sea fijada por medio de ensayos. No hay, pues, inconveniente, en que los valores de R y BD sean distintos de los antes citados, ni incluso en que la solera tenga una primera parte horizontal antes de iniciarse el arco de círculo.

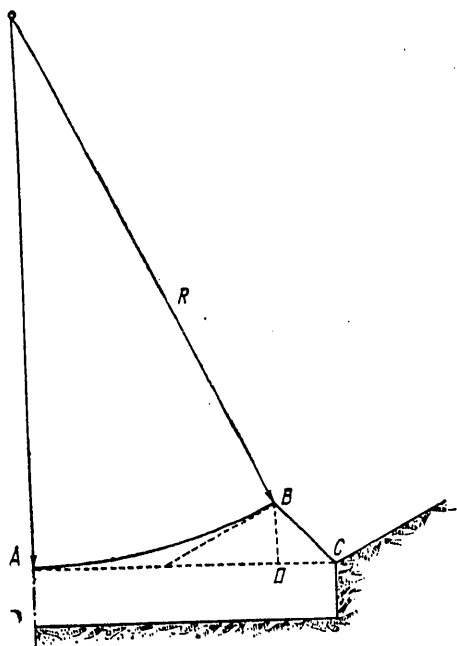


Figura 4.ª

Damos por conocido el funcionamiento de esta solera de resalto, basado en el rulo hidráulico disipador de la energía cinética del agua, y en el llamado por el Profesor Aguila "remolino aporcador", que produce un terraplenado al pie de la presa. En este último efecto creemos tiene favorable influencia la inclinación BC del extremo, pues si éste es vertical, siempre suele producirse algún descalce, aunque en muchos casos su pequeña magnitud hace no sea peligroso para la seguridad de la obra. Como ejemplo damos la fotografía de la figura 5.ª, correspondiente al ensayo del tramo de compuertas de ocho metros de la Presa de Montijo.

Pasando ya a la descripción de los ensayos, diremos que éstos se han referido únicamente al verte-



Figura 5.ª

dero fijo y al tramo de compuertas de ocho metros. No se consideró necesario hacerlos de los otros tramos por desprenderse del Proyecto que su autor decidió enrasar los extremos de todas las soleras con el de la que resultara más larga, que es el correspondiente a las Stoney de ocho metros.

Todos los ensayos se realizaron en el canal de vidrio con modelos a escala 1:50, estando representado el terreno por arena totalmente suelta de granos retenidos por los tamices de ocho y treinta mallas por pulgada.

En el vertedero fijo, la solución de solera corta con bordillo triangular dió un resultado satisfactorio, obteniéndose, para el caudal máximo (2 700 m.³/seg. por toda la presa, y 1 230 por este tramo), una máxima socavación equivalente a 0,50 m. (*). Además, el terreno alcanza rápidamente un perfil de equilibrio, como pudo comprobarse haciendo dos ensayos

(*) No parece necesario hacer notar que esta cifra no presupone que la máxima socavación sea realmente ésta cuando la obra entre en funcionamiento y tiene sólo un valor relativo para comparar entre sí diversos experimentos realizados en las mismas condiciones.

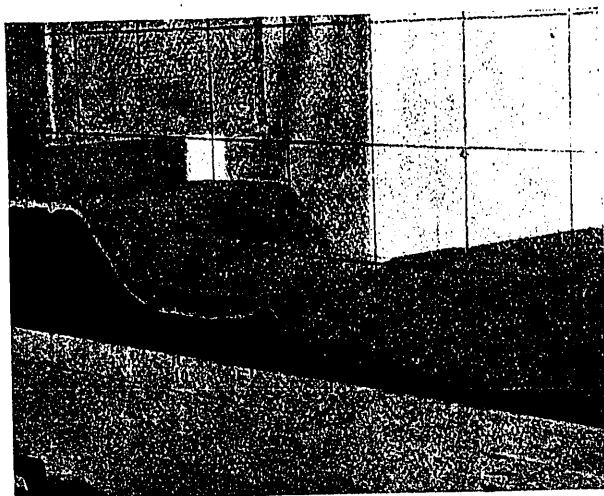


Figura 6.ª

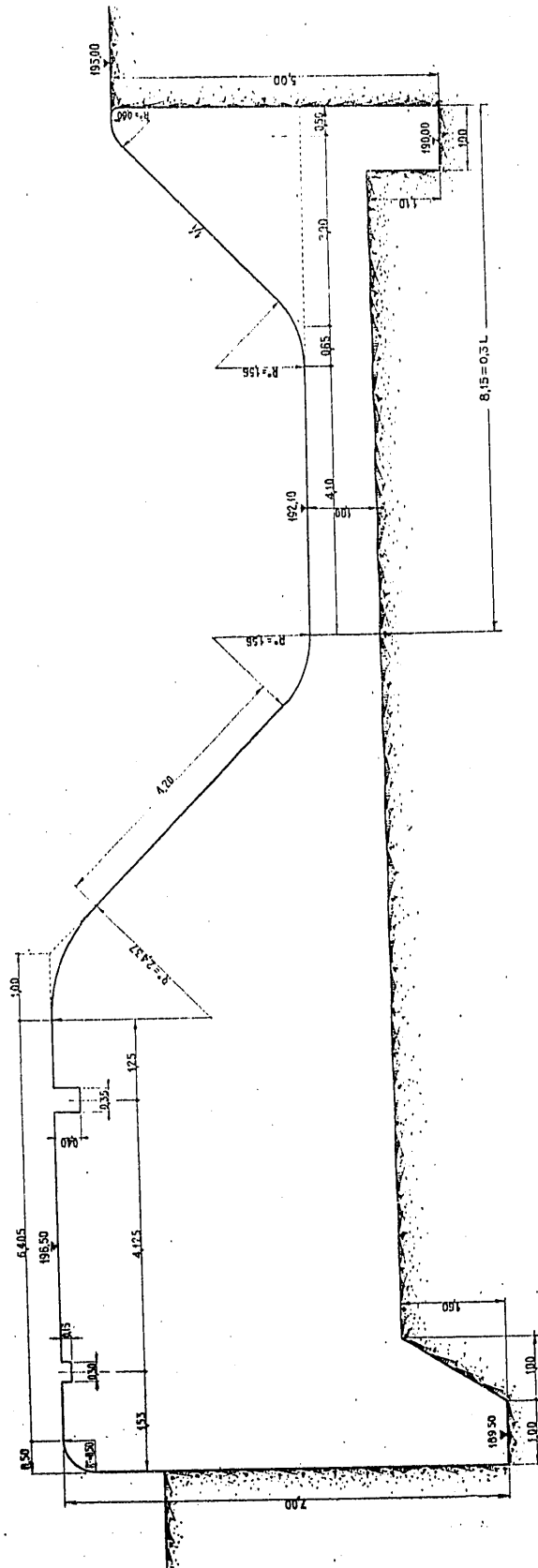


Figura 7.



Figura 8.

con el mismo caudal y tres y cinco horas de duración, sin apreciarse ningún aumento en el valor máximo citado.

Para la parte de compuertas estudiada se proyectaba también una solera del mismo tipo. Ensayada, dió resultados aceptables para aberturas de 1 y 2 m., siendo, sin embargo, muy grandes e inadmisibles para 3 m. (*). La razón de esta anomalía parece ser la gran diferencia de cotas entre el extremo de la solera y el terreno (fig. 6.^a).

Ya indicamos antes que la solución más perfecta consiste en colocar un segundo azud agua abajo, a una distancia del comienzo de la solera igual a la longitud de resalto, y de tal modo dimensionado que, en el caso más desfavorable, asegure la profundidad requerida para que éste se forme, multiplicada por el coeficiente de anegamiento. Entonces, el resalto tiene sitio para desarrollarse libremente y el dispositivo amortiguador funciona en las mejores condiciones (**).

(*) Hay que tener en cuenta que, siguiendo al Proyecto, se puso como cota agua abajo la correspondiente al desagüe localizado de una sola compuerta Stoney y una automática. En la realidad es difícil se trabaje en condiciones tan duras.

(**) La solución de azud auxiliar ha sido empleada en varias presas españolas, como La Minilla, Albina, las proyectadas para el río Zadorra, etc.

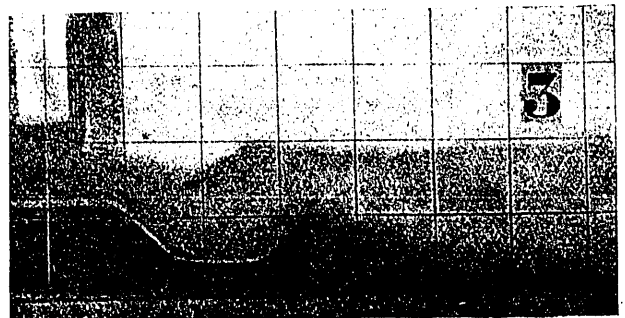


Figura 9.

Lo mismo ocurre cuando la excavación para la solera no es muy grande, aun sin azud auxiliar, como hemos visto en el vertedero fijo. En cambio, en nuestro caso, sobre la solera, la cota es suficiente para la formación del resalto, pero al llegar a su extremo la altura de agua se reduce bruscamente y el bordillo no basta para asegurar una protección eficaz. En cambio, con caudales bajos, como tanto la longitud como la profundidad necesarias son menores, el sistema de amortiguamiento funciona en buenas condiciones.

Para paliar estos inconvenientes sin recurrir al segundo azud — que encarecería notablemente la obra, sin ser necesario, para el desagüe por varios de los tramos —, se probó el tipo representado en la figura 7.^a, con el que se buscaba reducir la socavación con el caudal máximo y a la vez lograr que el terreno quede a mayor altura en las cercanías de la obra. Se contaba para ello con la influencia que pudiera tener la elevación del extremo de la solera hasta la cota del terreno.

Los resultados, como vamos a ver, correspondieron a estas previsiones:

1) Para 1 metro de abertura de compuerta ($q_u = 5,87 \text{ m}^3/\text{seg.}$) en la zona más cercana a la presa, no sólo se conserva la cota primitiva del terreno, sino que éste queda algo sobreelevado. La máxima socavación es ligeramente inferior y se produce en un punto más alejado que con la solución anteriormente ensayada (fig. 8.^a).

2) Para 2 m. ($q_u = 10,78 \text{ m}^3/\text{seg.}$), los resultados son comparables a los obtenidos con el bordillo triangular (fig. 5.^a).

3) Para 3 m. ($q_u = 16,21 \text{ m}^3/\text{seg.}$ máximo), las importantes socavaciones que se producían con la solución anterior desaparecen, obteniéndose un perfil del terreno que se aproxima bastante al del ensayo con caudales medios. En el extremo de la solera se produce algún descalce, quedando de todos modos la arena a mayor altura que con el bordillo triangular (figura 9.^a).

Con los datos obtenidos de los dos ensayos reseñados se han proyectado directamente los dispositivos de amortiguamiento para el tramo de compuertas automáticas y Stoney de seis metros. La solución propuesta ha sido solera corta con bordillo triangular en ambos casos, por ser bastante más reducido el caudal unitario y el desnivel entre ésta y el terreno.

A pesar de haberse propuesto para uno de los tramos una solución de mayor cubo, el ahorro sobre lo proyectado, en el total de la obra — tanto por los ensayos como por los aforos, retoque del cálculo del resalto y de los desagües —, ha sido de 286 m^3 de hormigón y 2100 m^3 de excavación en roca dura.

Presa de derivación del Canal bajo del Bierzo.

Esta presa, llamada también de la Fuente del Azufre, se construye por la División Hidráulica del Norte de España. Es un azud de fábrica de $29,56 \text{ m.}$ de altura y 30 de longitud de coronación, sobre la que van tres compuertas Stoney. Bajo la compuerta central existe otra del mismo tipo que actúa como desagüe de fondo. Entre ambas se inserta una pieza de hormigón armado (fig. 10).

El proyecto prevé se evacuen sobre la coronación hasta $950 \text{ m}^3/\text{seg.}$ Para avenidas mayores se abrirá el desagüe de fondo, llegándose de este modo a permitir el paso de un máximo de $1600 \text{ m}^3/\text{seg.}$

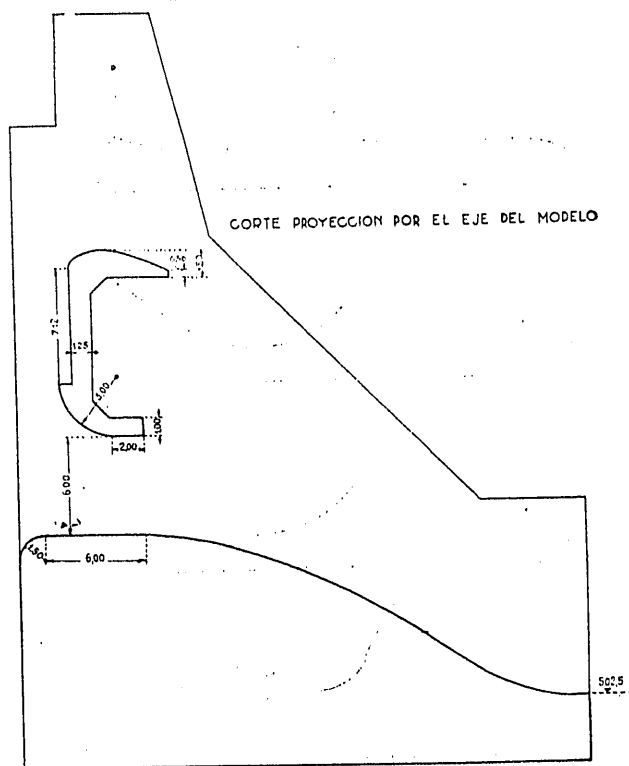


Figura 10.

Agua abajo, sobre la roca firme, se asientan 11 metros de acarreo.

Se ensayaron en primer lugar los tramos laterales (Perfil Creager) hasta fijar un tipo de amortiguador aceptable, y hallado éste, en un modelo de conjunto de la obra, se comprobaron los resultados y se procedió a determinar la solera más conveniente para el vano central, de características distintas, como hemos visto. Todos los ensayos se realizaron en el canal de vidrio, con modelos a escala $1:100$ y arena de las mismas condiciones antes reseñadas.

Se probaron, sucesivamente, las cinco soleras de la figura 11.

Las (1) y (2) son soleras con bordillo de longitudes 18 y 30 por 100 de la de resalto, respectivamente.

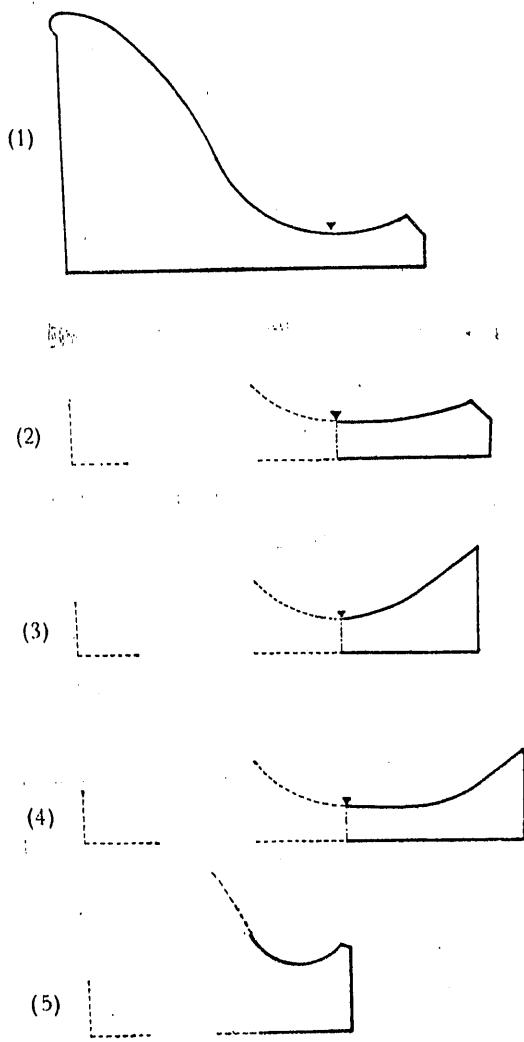


Figura 11.

La (3) tiene una primera parte curva ($r = 13$ m.), seguida de una recta inclinada que llega hasta el nivel del terreno. La (4), conservando de la anterior el radio y la inclinación del extremo, es 4,80 m. más larga. Es la solución más costosa. Por último, la (5) es un trampolín con el que se intentaba lanzar la lámina a tal distancia del pie de la presa que la socavación no resultase peligrosa, sin necesidad de hacer intervenir el efecto resalto,

Los resultados de esta serie de ensayos han sido los siguientes:

a) Para el caudal máximo con (1) y (5) se producen socavaciones de gran magnitud. (2) y (4) tienen un funcionamiento mejor y bastante semejante, con ligera ventaja para la segunda. Por último, con (3), la socavación es mucho más reducida y queda estabilizada por encima del nivel que en la obra correspondería a la roca de cimentación.

Los esquemas de la figura 12 permiten comparar los resultados obtenidos en cada caso.

b) Con caudales medios también es la más favorable la solución (3), con poca diferencia con la (4).

c) Con caudales pequeños, el mejor resultado se obtiene con la solera (2), seguida por (4) y (3). Sin embargo, con cualquiera de ellas — salvo la (5) — las socavaciones son poco importantes.

De lo expuesto podemos deducir algunas consecuencias prácticas:

En lo referente a las soleras con bordillo (1) y (2), no es necesario hacer nuevas indicaciones, pues en este caso los inconvenientes ya citados, debidos a la diferencia de niveles solera-terreno, son aún mayores que en la Presa de Montijo.

Los mejores resultados se obtienen con (3), cuenco de fondo cilíndrico con su extremo al mismo nivel del terreno (*). Un amortiguador de este tipo deberá siempre ser ensayado cuidadosamente, pues si resultaran insuficientes la longitud o la profundidad del cuenco, puede producirse el arrastre del rufo superior, funcionando entonces con muy escaso rendimiento. La forma curva del fondo parece tener influencia favorable.

El peor funcionamiento de la solución (4) — la de mayor volumen — parece ser debido a que el estar su extremo a nivel inferior al del cauce, anula la ventaja de su mayor longitud.

En cuanto al trampolín (5), el intento de lograr una protección del pie de la presa sin recurrir al resalto, no tuvo éxito — como podía preverse —, por tratarse de un caudal unitario muy elevado.

Adoptada en principio para los vanos laterales la solera (3), quedaba por resolver el problema del vano central, en donde al caudal antes supuesto se suma el evacuado por la compuerta del fondo. Hay que tener en cuenta que por esta última se proyecta pasen 700 m.³/seg., que en la máxima avenida se unen a 268 que, entre las dos pilas, vierten sobre la corona-

(*) En las Presas de Almoguera y Zorita de los Canes se ha aplicado un dispositivo parecido, aunque con bastante menor longitud relativa. Esto tiene por consecuencia que una mayor parte del proceso de disipación de la energía se realice en la parte de cauce no revestido. Ello sería peligroso en un caso como el nuestro, de alto caudal unitario. (Puede verse Gómez Navarro-Aracil, *Salto de Agua*, pág. 884.)

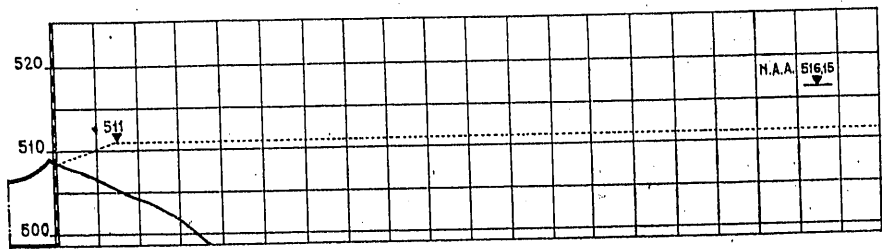
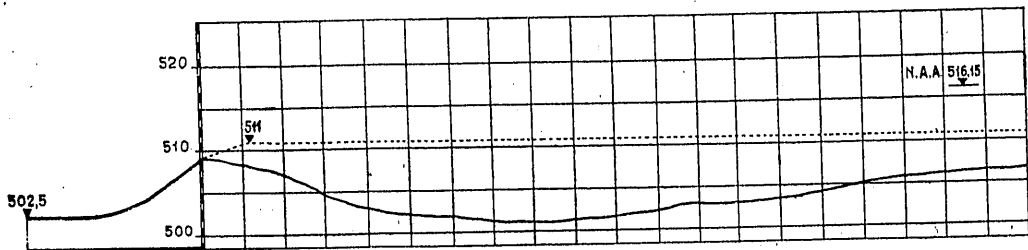
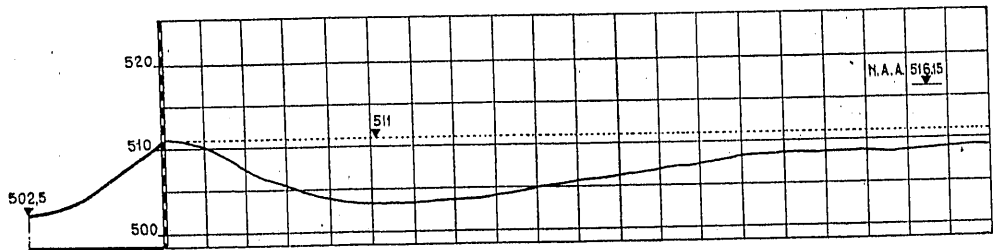
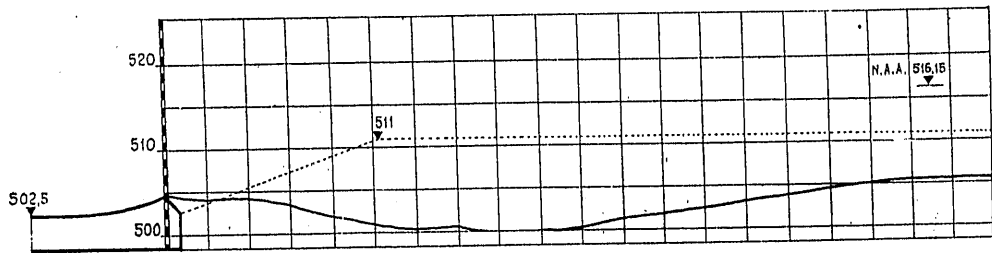
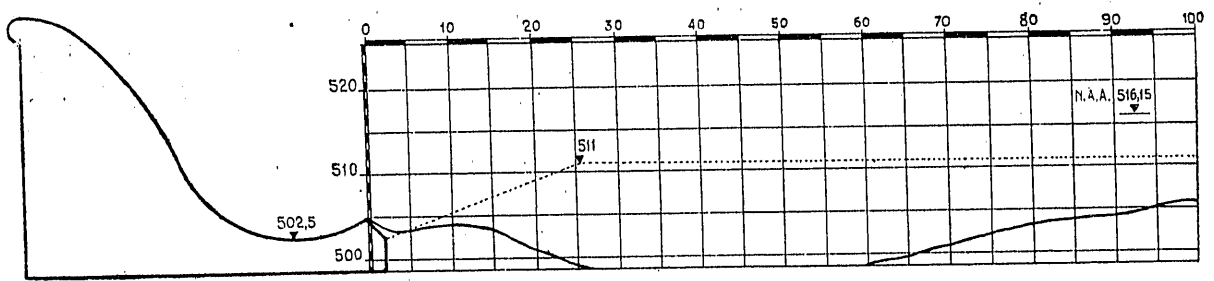


Figura 12.

ción (*). Vemos, pues, que las condiciones impuestas para el ensayo son bastante duras, desde el punto de vista de la obra; hay que tener en cuenta que el caudal de 1 600 m.³/seg., supuesto en el Proyecto, pro-

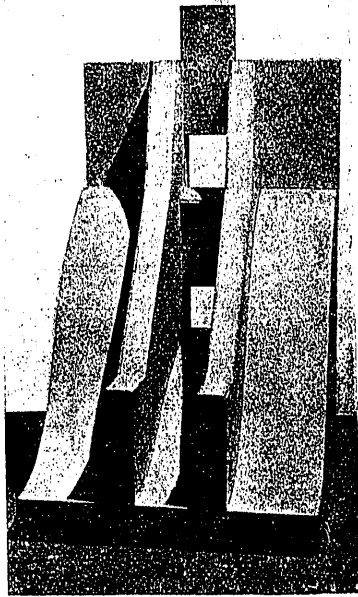


Figura 13.

cede de la aplicación de fórmulas que dan el máximo previsible en un período de mil años.

El modelo de conjunto de la presa, a escala 1:100, con el que se trabajó también en el canal de vidrio, pues no se consideró necesario representar detalladamente el cauce del río, aparece en la figura 13. Con él se han hecho ensayos en las tres hipótesis siguientes:

- a) Evacuación del máximo caudal previsto sobre la coronación (950 m.³/seg.).
- b) Compuerta de fondo, únicamente, abierta (700 metros cúbicos por segundo). Corresponde al caso de limpia de sedimentos.
- c) Evacuación de la máxima avenida con todas las compuertas abiertas (1 600 m.³/seg.).

(*) Como el ancho es de 6 m., tenemos un caudal unitario máximo evacuado en esta zona de 161 m.³/seg. Indudablemente, al llegar a la solera la lámina actúa en una longitud mayor (la de las pilas, e incluso por penetración en los vanos laterales). Para indicar las condiciones en que se ha realizado el ensayo, damos los caudales unitarios máximos en algunas presas importantes: Wilson, 28,9; Dnieper, 35,2; Ryburg-Schwors-tädt, 52,1; Grand Coulee, 55,2 m.³/seg. Como valores parecidos al nuestro hemos encontrado: Rock Island, 153; L'Aigle, 167.

En la obra que estudiamos parece haberse sacrificado la facilidad de desagüe a la economía derivada del emplazamiento en una cerrada muy estrecha.

Para mejorar el funcionamiento en la parte central se probó en primer lugar a alargar en ella la solera hasta tener la sección de la figura 14. En los laterales se conservaba la (3).

Como consecuencia de esta mayor longitud del centro, en el caso a) se forman dos remolinos de eje vertical que dan una socavación muy disimétrica. Ésta, como podía esperarse, es menor que en el eje, pero a los lados sobrepasa el nivel que correspondría a la roca.

En el caso b), la erosión no alcanza valores peligrosos. Transversalmente se advierten dos zonas más elevadas en prolongación de las pilas, recobrando rápidamente el terreno su nivel normal.

En c), el gran caudal evacuado hace que, a pesar del alargamiento de la solera, se produzcan socavaciones importantes. Éstas son algo menores en el centro que en los laterales, llegando hasta la cota correspondiente a la roca.

Vistos estos resultados, se ensayó a continuación la solera continua del mismo tipo que la seleccionada para los vanos laterales. Con ella, en a) se comprueba que la erosión no sobrepasa la capa de acarreo, y en sentido transversal, el perfil es casi uniforme. Esto sólo puede atribuirse a la desaparición de los dos remolinos antes citados.

En la figura 15 pueden compararse los resultados con las dos soluciones.

Actuando sólo la compuerta de fondo, la socavación es algo superior a la observada en el ensayo co-

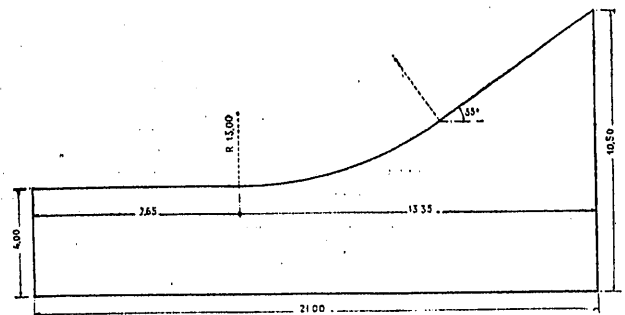


Figura 14.

respondiente de la serie anterior, particularmente en el eje de la presa.

Con todas las compuertas abiertas, la erosión, siempre importante por las duras condiciones de desagüe, es apreciablemente menor y más uniforme. Es también mejor la protección de la zona en inmediato contacto con la obra.

Como conclusiones de este estudio diremos que la solera continua da mejor resultado para $Q = 950$ y $1 600$ m.³/seg., y en cambio, para $Q = 700$ m.³

por segundo, hay alguna ventaja para la discontinua, como podía preverse por estar su parte central amoldada a la magnitud del resalto que, en este caso particular, se produce.

Por todo ello, parece sería lo mejor aprovechar las ventajas de ambas soluciones encomendando la protección del pie de la presa a una solera continua análoga a la ensayada para el vano central (fig. 14). Pero entonces el dispositivo amortiguador representaría una parte desmesurada del volumen total de la obra. Por ello, y teniendo en cuenta que con la so-

tal crecida seguirá con toda probabilidad un largo período de desagüe normal, no parece pueda resultar afectada la seguridad de la obra, sino, como máximo, exigirse alguna consolidación del terreno. Este mismo criterio fué sustentado por los Ingenieros de la División Hidráulica del Norte de España que presenciaron algunos de los ensayos.

* * *

Terminamos con esto nuestro resumen. A veces, en la lectura de publicaciones de Compañías Hidro-

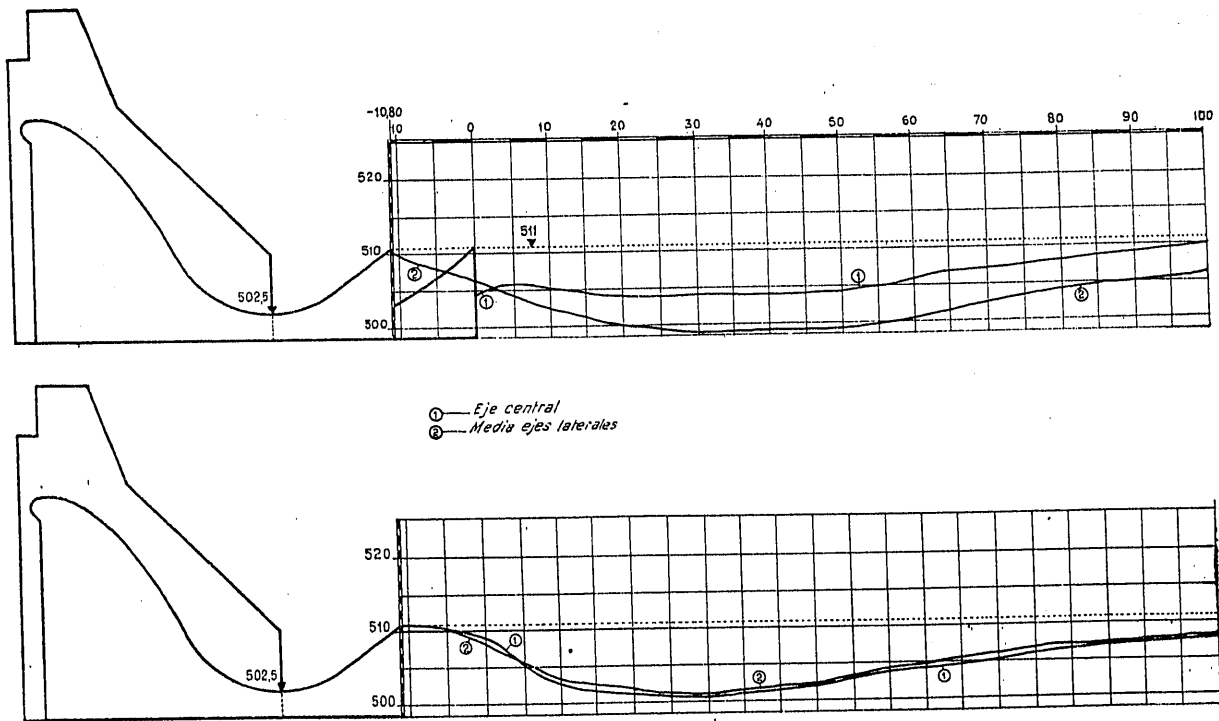


Figura 15.

lera continua igual a la adoptada para los vanos laterales se obtienen socavaciones perfectamente aceptables para el máximo caudal a evacuar por la coronación, así como para el caso de apertura de la compuerta de fondo, se recomendó como la mejor solución práctica.

En cuanto a la evacuación de la máxima avenida con todas las compuertas abiertas, el estudio indica que las socavaciones de acarreo de gravas medias pueden ser de importante volumen con cualquier tipo de amortiguador de dimensiones no prohibitivas.

Como, según ya hemos indicado, el caudal supuesto en este caso corresponde a la aplicación de fórmulas para un tiempo de mil años, y por tanto, a una

eléctricas o Confederaciones, una fotografía o una breve nota nos indican que en sus laboratorios se trabaja en problemas parecidos al que nos ha ocupado. Los ensayos que hemos descrito no representan ningún avance en la materia, pero deseáramos que su reseña en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS sirviera para animar a nuestros compañeros a hacer lo mismo con sus soluciones.

La protección del terreno al pie de los vertederos es un asunto de mucho interés práctico y en el que caben aún grandes perfeccionamientos. Contrastando las experiencias de los distintos Ingenieros españoles que se han ocupado de esta cuestión, creo podrían lograrse avances técnicos de importancia.