

ALGUNOS ENSAYOS HIDRAULICOS EN MODELO REDUCIDO

Por MARIANO FERNANDEZ BOLLO y ALEJANDRO DEL CAMPO AGUILERA,
Ingenieros de Caminos.

Presentan los autores al comienzo una relación de diez ensayos en modelos reducidos realizados en el Laboratorio de Estudios Hidráulicos, de los cuales describen y comentan dos que consideran particularmente interesantes y que, efectivamente, lo son, como podrá comprobar el lector: aliviadero de la presa de Chandreja, sobre el río Nareja, y desembocadura del canal de Montefurado, que aprovecha las aguas de los ríos Sil y Bibey.

En el Laboratorio de Estudios Hidráulicos, en Madrid, se han realizado varios ensayos en modelo reducido para el proyecto de obras de Saltos del Sil, S. A., en algunos de los cuales se ha llegado a resultados interesantes, especialmente por tratarse de muchos casos de obras construidas y cuyo funcionamiento ha podido ser observado en la realidad.

Los ensayos realizados son:

1. *Presa de San Esteban.* — Estudio del cuenco amortiguador de esta presa arco-gravedad, de 115 metros de altura, para un caudal evacuado de 4.500



Fig. 1.* — Ensayo del aliviadero de la presa de San Esteban.



Fig. 2.* — Ensayo del aliviadero de la cámara de carga del salto de Ponte Novo.

metros cúbicos/seg. por el vertedero situado sobre la coronación de la presa. La reducida anchura del cauce del río y la fuerte curvatura de la presa dificultaban una solución clásica, habiéndose adoptado unos peraltes y tabiques que conducen al agua desde la circulación convergente con que baja por el paramento de la presa al paralelismo en el cuenco. Estos ensayos fueron complementarios de los descritos por el Ingeniero de Caminos D. Francisco Zapata en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de noviembre de 1948.

2. *Presa de Guistolas.* — Estudio de aliviadero de esta presa-vertedero, de 32 m. de altura, capaz de evacuar un caudal de 650 m.³/seg., alejando la lámina del pie de la presa mediante un trampolín de lanzamiento bajo.

3. *Cámara de carga del Salto de Ponte-Novo.* — Trampolín dispersor de la lámina vertiente, al final del canal de descarga del aliviadero de dicha cámara de carga.

4. *Aliviadero de la presa de Chandreja.* — Estudio del aliviadero lateral de esta presa, cuyos ensayos y resultados describiremos más adelante.

5. *Toma de agua del Salto de San Esteban.* — Estudio de la circulación y pérdidas de carga en la embocadura y rejillas.

6. *Canal de Montefurado.* — Estudio de un difusor en la desembocadura del canal en el embalse, que más adelante describiremos con detalle.

7. *Toma de agua del Salto de Sequeiros.* — Estudio de pérdidas de carga al aumentar el caudal por instalación de nuevos grupos y colocar una compuerta en la entrada del canal.

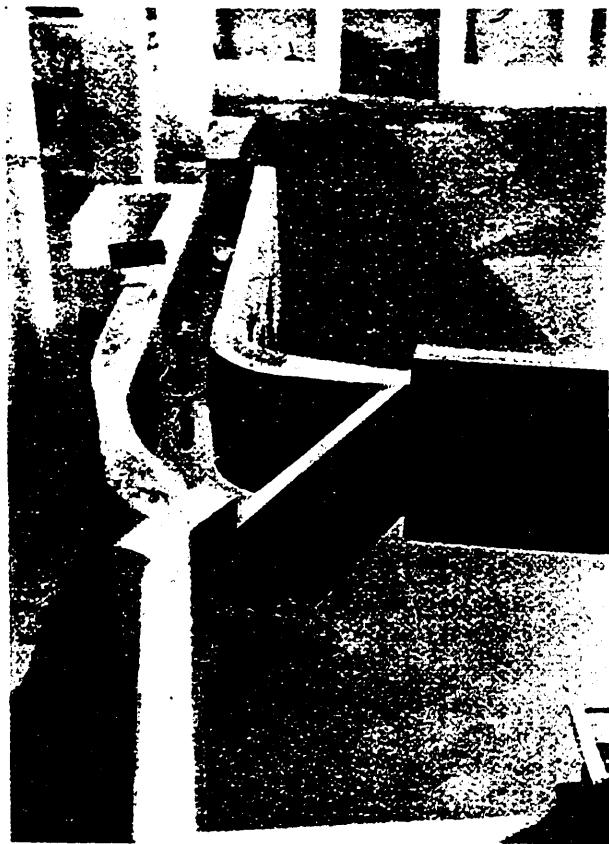


Fig. 3.^a — Modelo de la toma de agua de Sequeiros.

8. *Túnel de desviación de San Esteban.* — Estudio del túnel de desviación trabajando a presión, después de cerrar la presa.

9. *Captación de Rabal.* — En el cruce del canal de San Cristóbal con el arroyo de Rabal se ha ensayado y construido una bóveda que desagua las avenidas sobre el canal, mientras las aguas medias penetran en él a través de una rejilla colocada en la zona central.

10. *Toma de agua del canal de Montefurado.* — Estudio del reparto de velocidades y pérdidas de carga en la embocadura y reja gruesa.

Se han efectuado otros ensayos para estudio de circulación por analogía eléctrica y modelos reducidos mecánicos, para estudiar el reparto de tensiones en estructuras difícilmente accesibles al cálculo.

A continuación describiremos los ensayos y resultados correspondientes al aliviadero de Chandreja y desembocadura del túnel de Montefurado, que están entre los que creemos tienen mayor interés.

Aliviadero de la presa de Chandreja. — La presa de Chandreja, situada sobre el río Navea, forma un embalse de 60 000 000 m.³ de capacidad, a la cota 910, aprovechándose la regulación en ocho saltos escalonados hasta la cota 110, con lo que la reserva de energía que puede almacenarse supera los 100 millones de Kw.-hora. La cuenca que vierte directamente al embalse es de 128.4 Km.² y se ha estimado un caudal máximo de avenidas de 500 m.³/seg.

La presa tiene una altura de 85 m. y está formada por contrafuertes con cabezas con sección en talla de diamante en el paramento en contacto con el agua, ensanchándose también el contrafuerte en las proximidades del paramento de aguas abajo, sin que se llegue al contacto entre contrafuertes más que en su zona inferior (fig. 4.^a). La central está alojada entre dos contrafuertes de la margen izquierda.

En el anteproyecto se disponía el vertedero sobre los contrafuertes centrales, desaguando directamente en el cauce del río. Sin embargo, el temor a que, siendo la lámina de agua relativamente gruesa, se produjeran vibraciones en los contrafuertes y el interés que tenía para la construcción el ahorrar trabajo en el cauce y disponer de un desagüe lateral 20 m. por debajo de la coronación que redujese el peligro de vertido en riada sobre los contrafuertes en construcción, nos indujeron a estudiar una solución con aliviadero lateral en la margen derecha, disponiendo para el vertedero de un estribo de gravedad.

El estribo de gravedad en que se coloca el vertedero está ligeramente inclinado respecto al eje de la presa (fig. 5.^a), con objeto de que los canales de descarga se vayan acercando al cauce y pueda dárseles pendiente sin aumentar la excavación. El vertedero está formado por dos vanos de 7.00 × 7.00 metros, que se cierran por compuertas de segmento, con una pantalla superior de hormigón armado que penetra bajo el nivel del embalse, sin llegar a tocar la lámina vertiente a plena abertura de compuerta, con lo que la altura de éstas queda reducida a 4.80 metros.

Se estudió la solución de construir un sólo canal para descargar el caudal evacuado por los dos vanos, pero al comparar con la solución que se adoptó de disponer canales independientes para cada compuerta, se comprobó que, además de reducirse el volumen de la excavación por la fuerte pendiente de la ladera, se simplifica la transición a la salida del vertedero y se mejoran las condiciones de explotación al quedar dos aliviaderos completamente independientes. La pendiente de estos canales es del 6 %, tienen una anchura de 5 m. y un calado de 3.00 m., a lo que

se añade un pretil de 0.50 m. de altura, con objeto de evitar que, por efecto del emulsionamiento del agua con el aire o por interferencias de ondas, pudiera saltar agua fuera de los canales.

El estudio hidráulico en modelo reducido de este aliviadero planteaba los dos problemas fundamentales siguientes:

cajeros producen sobreelevaciones de nivel incrementadas por su interferencia, siendo frecuente tener que hacer en estas zonas recorrimientos sucesivos de cajeros hasta conseguir que no vierta el agua sobre ellos. No se pueden tratar las transiciones como en régimen lento, sino que debe procurarse que las ondas que inevitablemente se produzcan interfieran entre sí



Fig. 4.^a — Presa de contrafuertes de Chandreja.

a) La transición, en régimen rápido, desde la sección de la compuerta a la del canal y las perturbaciones que, como consecuencia de ello, pudieran mantenerse a lo largo del canal.

b) El lanzamiento de las láminas de agua condicidas por los canales para restituirlas al cauce del río.

Cuando se presentan curvas y transiciones en canales en los que circula el agua en régimen rápido, las ondas que se originan en los quiebros de los

de manera que a la salida de la transición vuelva a la uniformidad la circulación del agua (*Saltos de Agua y Presas de Embalse*, de Gómez Navarro y Aracil, página 501, y *Proceedings of A.S.C.E.* de noviembre de 1949, "High-Velocity Flow in open, Channels").

Este problema se complica generalmente con los efectos sobre las perturbaciones citadas de los cambios de caudal, que se traducen en desplazamientos de las sobreelevaciones.

En el caso de un estrechamiento en los puntos en

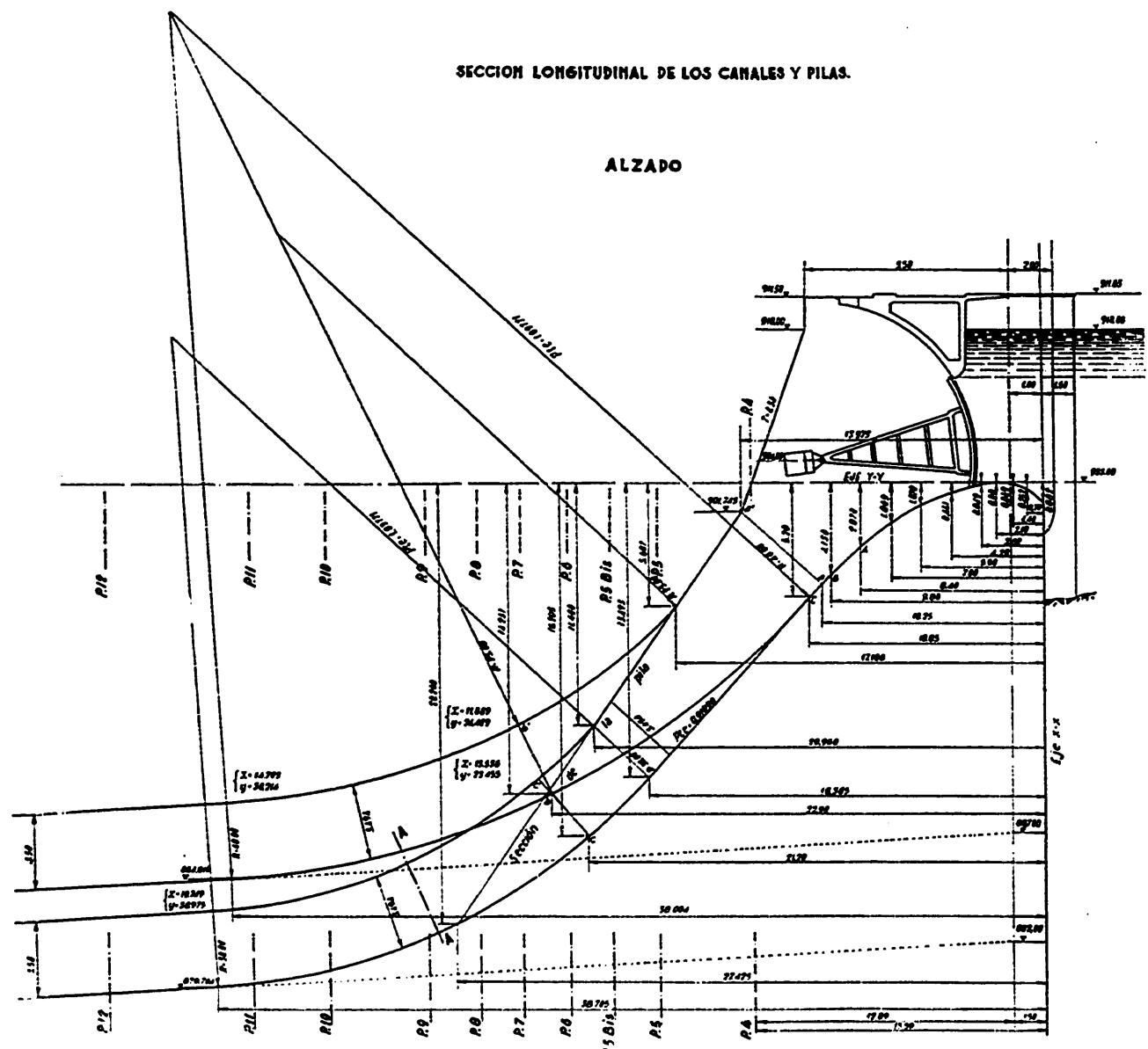


Fig. 5.^a — Aliviadero de Chandreja: Vertedero y transición.

PLANTA

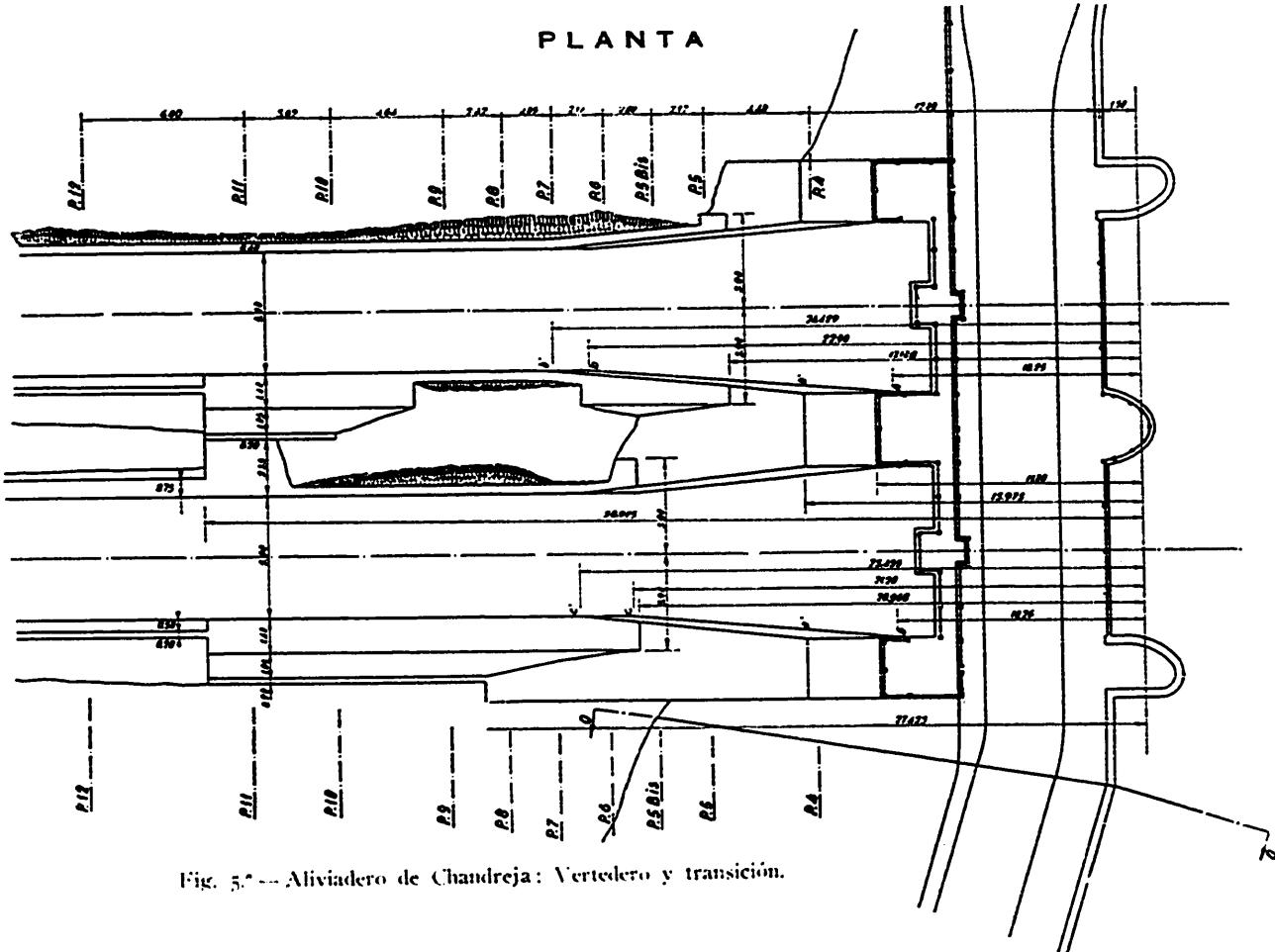


Fig. 5.º — Aliviadero de Chandreja: Vertedero y transición.

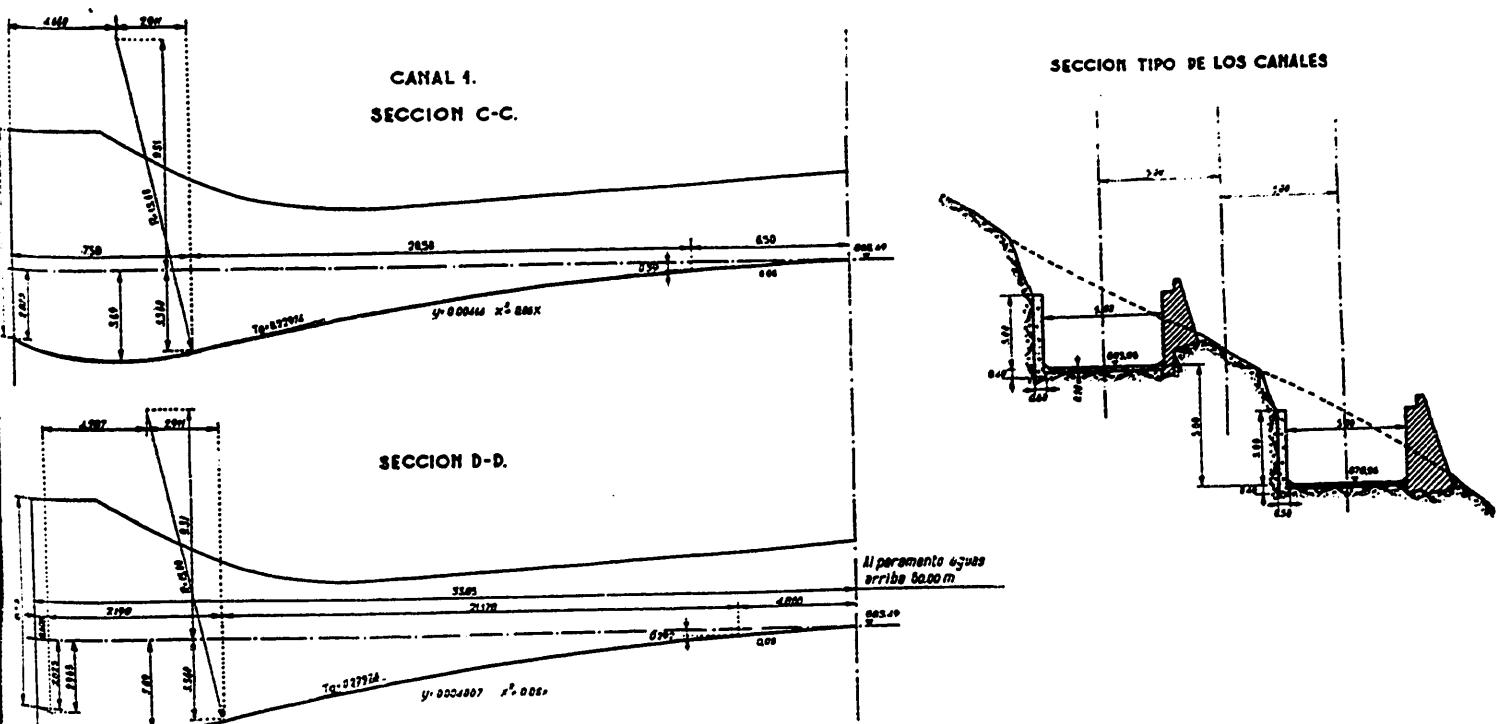


Fig. 6.^a — Aliviadero de Chandreja: Canales de descarga.

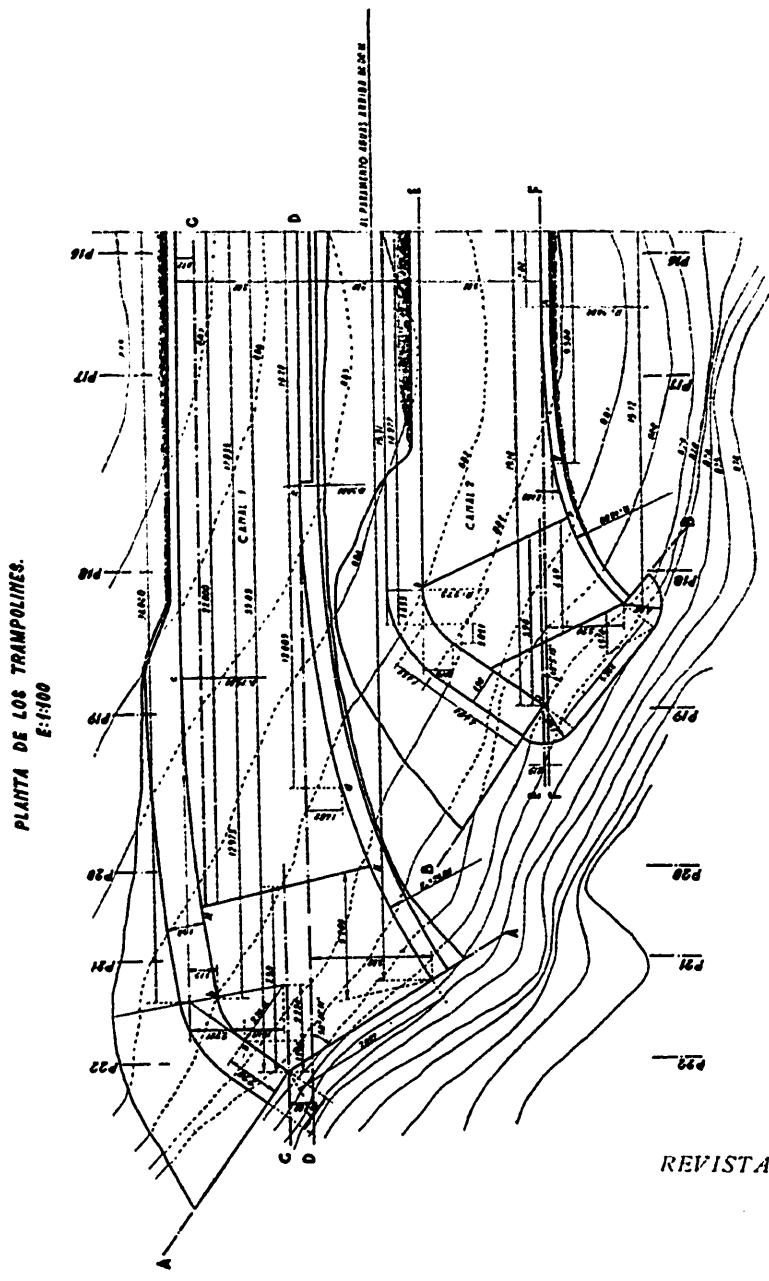
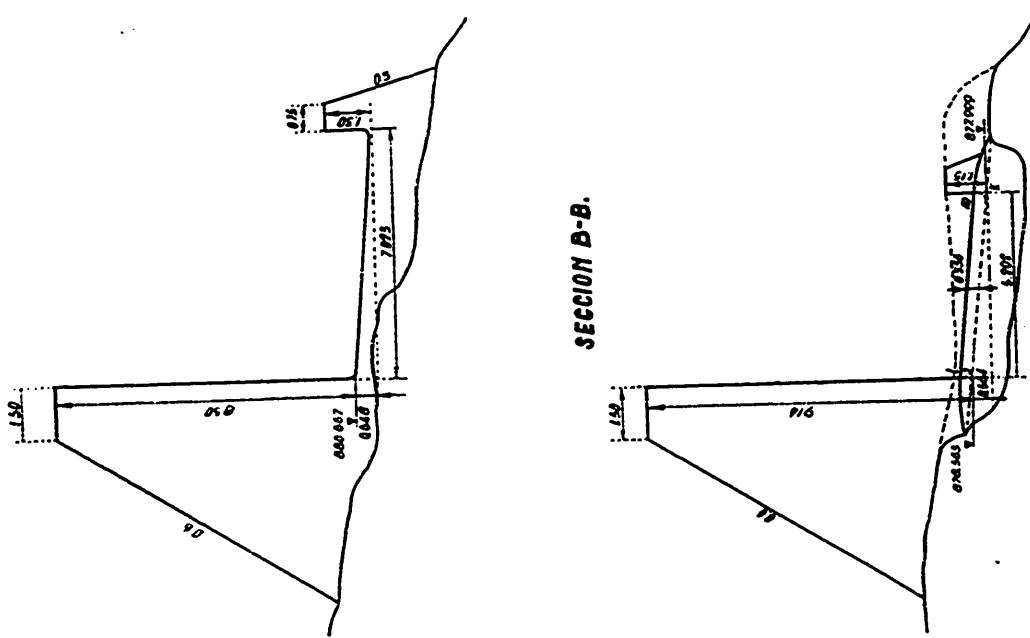


Fig. 7.^a — Aliviadero de Chandreja: Trampolines de lanzamiento.

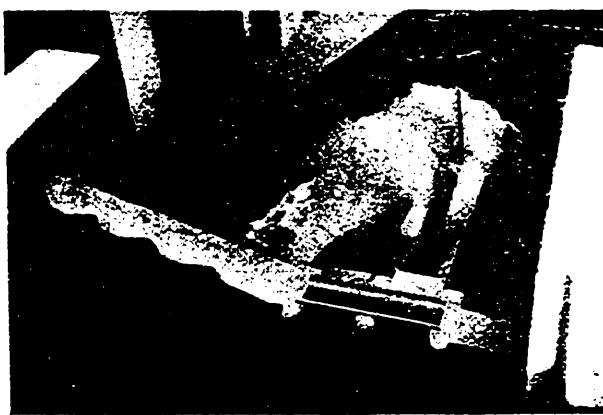


Fig. 8.^a — Modelo de Chandreja: Vertido.

que quiebran los cajeros, se producen ondas que se transmiten con una celeridad $c = \sqrt{gh}$, donde h es el calado en caso de existir pequeña diferencia entre los de ambos lados del frente de onda, que formará un ángulo con la dirección primitiva de la corriente

β_1 tal que: $\operatorname{sen} \beta_1 = \frac{\sqrt{gh}}{v}$, siendo v la velocidad inicial. Como el canal es simétrico, al interferir las dos ondas producidas en el plano medio, será el mismo efecto que si se reflejasen en él, volviendo la circulación al paralelismo, que se conservará si los frentes de las nuevas ondas formadas alcanzan al cajero en los quiebros de salida de la transición, pues en caso contrario se seguirían reflejando las ondas en los cajeros hacia aguas abajo, sin que ya pudiera alcanzarse el régimen uniforme. Para que se produzca la condición anterior, la longitud de la transición debe ser:

$$L = \frac{b_1}{2 \operatorname{tg} \beta_1} + \frac{b_2}{2 \operatorname{tg} (\beta_2 - \theta)} = \frac{b_1 + b_2}{2 \operatorname{tg} \theta}$$

siendo, b_1 y b_2 , los anchos del canal antes y después de la transición, respectivamente; θ , el ángulo que en la transición forman los cajeros con el eje del canal; β_1 y β_2 , los ángulos de cambio de dirección de la corriente al comienzo de la transición y al interferir las ondas en el plano medio del canal.

En nuestro caso, la transición en planta coincide con la curvatura por la que se pasa del paramento del estribo al canal con menor pendiente, por lo que en las ecuaciones de la celeridad habrá que sustituir g por $\left(g \cos \alpha + \frac{v^2}{R} \right)$, siendo α el ángulo con la horizontal, v la velocidad del agua y R el radio de curvatura de la transición. Esta circunstancia permite reducir la longitud de la transición, pero dificulta el estudio teórico del problema, siendo necesario recurrir a los ensayos en modelo reducido para comprobación de los resultados.

Los ensayos se hicieron sobre un modelo a

escala 1/50. La longitud de la transición que se había elegido parecía adecuada, según los resultados de los ensayos. Sin embargo, la altura de las ondas era mayor que la estimada, probablemente debido a la influencia de la embocadura agua arriba de las compuertas, lo que obligó a aumentar la altura de los cajeros en la zona de transición. Agua abajo de la transición quedaba un penacho en el centro del canal, sin que llegase a desbordar los cajeros, y que no se observó al efectuar las pruebas del aliviadero construido, por lo que es probable tuvieran influencia en su formación efectos de tensión superficial.

Como puede verse en las fotografías tomadas durante las pruebas de los aliviaderos, el agua circula en los canales con bastante uniformidad, y el resguardo que queda hasta la coronación de cajeros es amplio y algo mayor que el del ensayo (comparar figuras 8.^a y 9.^a).

El otro problema a estudiar en modelo reducido era el lanzamiento y dispersión de las láminas de agua conducidas por los canales del aliviadero, de



Fig. 9.^a — Obra de Chandreja: Circulación en canal izquierdo.

modo que fuesen a caer en el cauce del río y la erosión producida quedase lo suficientemente alejada del pie de la presa para que no pudiese afectar a su estabilidad.

En su zona final descienden con mayor pendiente los canales, elevándose su solera a continuación, para formar trampolines que despeguen la lámina de agua de la ladera; sin embargo, el efecto principal se consigue mediante unos pronunciados cambios de dirección de los cañeros derechos, con los fines siguientes: *a)* Cambiar la dirección en planta del movimiento del agua, dirigiéndole hacia el cauce. *b)* Producir una elevación de la lámina, ayudando al efecto de lanzamiento de los trampolines del perfil longitudinal. *c)* La onda que se produce por el cambio brusco de dirección, dispersa y hace girar la lámina, con lo que parte de la energía se amortigua en el aire y el impacto se reparte en una superficie mayor de cauce.

La semejanza de este último fenómeno entre el modelo y la obra real está influída por la excesiva tensión superficial relativa del agua del modelo. Este efecto se traduce en la mayor división real del vertido, con ventaja para la seguridad. Esto no representa



Fig. 10. — Obra de Chandreja: Circulación y lanzamiento en canal derecho.



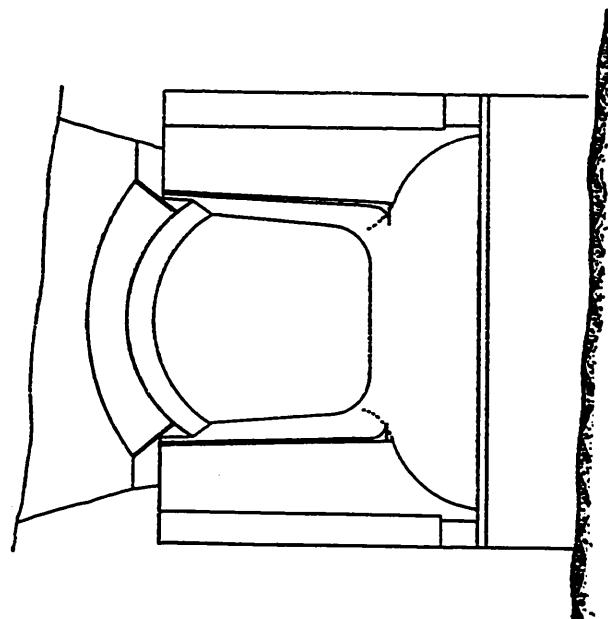
Fig. 11. — Obra de Chandreja: Vertiendo por el canal izquierdo.

un inconveniente importante en los ensayos si la escala no es excesivamente pequeña, tal como 1/100 o menor.

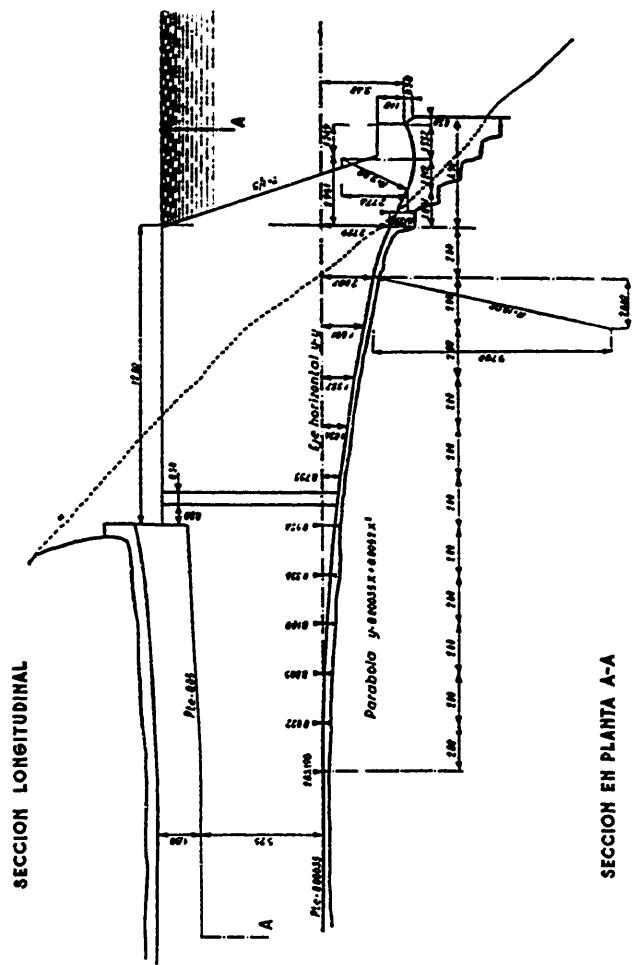
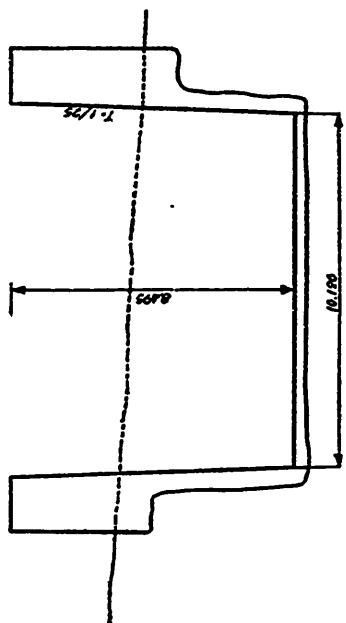


Fig. 12. — Obra de Chandreja: Vertiendo por el canal derecho.

VISTA DE FRENTE



SECCION B-B



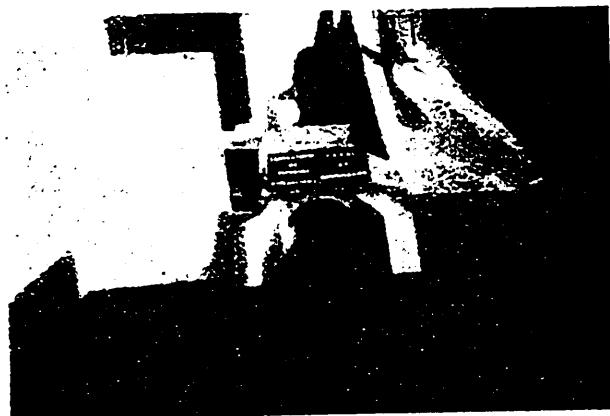


Fig. 14. — Canal de Montefurado: Conjunto de la desembocadura en el modelo.

En el curso de los ensayos en modelo reducido se estudiaron varias soluciones para la forma de salida de los canales, tratando de conseguir las menores erosiones posibles, en diversas condiciones de funcionamiento, sin aumentar la obra inútilmente. Como puede verse en las figuras, el canal izquierdo sufre a su terminación una desviación más pronunciada que el derecho, con objeto de que no lleguen a encontrarse en el aire las dos láminas. La erosión máxima en las condiciones más desfavorables resultó en modelo que sería del orden de 4 m., bastante alejada del pie de la presa; esta profundidad de erosión la consideramos excepcionalmente reducida para aliviaderos con lanzamiento. Cualquiera de los dos canales se puede usar independientemente, con la única precaución de no funcionar permanentemente con caudales inferiores a $50 \text{ m}^3/\text{seg.}$, para que la lámina de agua se despegue francamente de la ladera,

aunque la compacidad del granito que la forma admite, sin peligro de erosión, la caída de pequeños caudales.

En la primavera de 1954 se efectuaron las pruebas del aliviadero de Chandreja, y durante el invierno de 1955 ha funcionado con relativa frecuencia. Durante las pruebas se observó que el funcionamiento concordaba perfectamente con el observado en modelo reducido, dispersándose totalmente las láminas (figuras 10 y 11) y arrastrando tal cantidad de aire en su caída que, al buscar éste salida del cauce, asciende por la ladera opuesta, arrastrando gotas de agua que producen una lluvia torrencial, con la crecida correspondiente de los arroyos de las laderas. Es impresionante ver funcionar un aliviadero de este tipo, apreciando visualmente la anulación de unos 300 000 Kw., que no alcanzan a remover pequeñas piedras sueltas en los retallos de una ladera de fuerte pendiente.

Desembocadura del Canal de Montefurado. — En el salto de Montefurado se aprovechan las aguas de los ríos Sil y Bibey, para lo que se ha construido en este último río un embalse, con central de pie de presa, al que se transvasarán las aguas del río Sil, derivadas mediante la presa de San Martín y conducidas por un canal de 4 kilómetros de longitud. Aproximadamente la mitad del recorrido del canal se realiza en túneles sin carga.

El canal está calculado para un caudal de 75 metros cúbicos/seg. en régimen uniforme. En su primer tramo tiene el canal una pendiente longitudinal de 0.00022, con una sección trapecial de 6.50 metros de ancho en la base, 5.25 m. de calado y talud de 1/10 en los cajeros; en la segunda parte del canal, en que predominan los túneles, se reduce el ancho

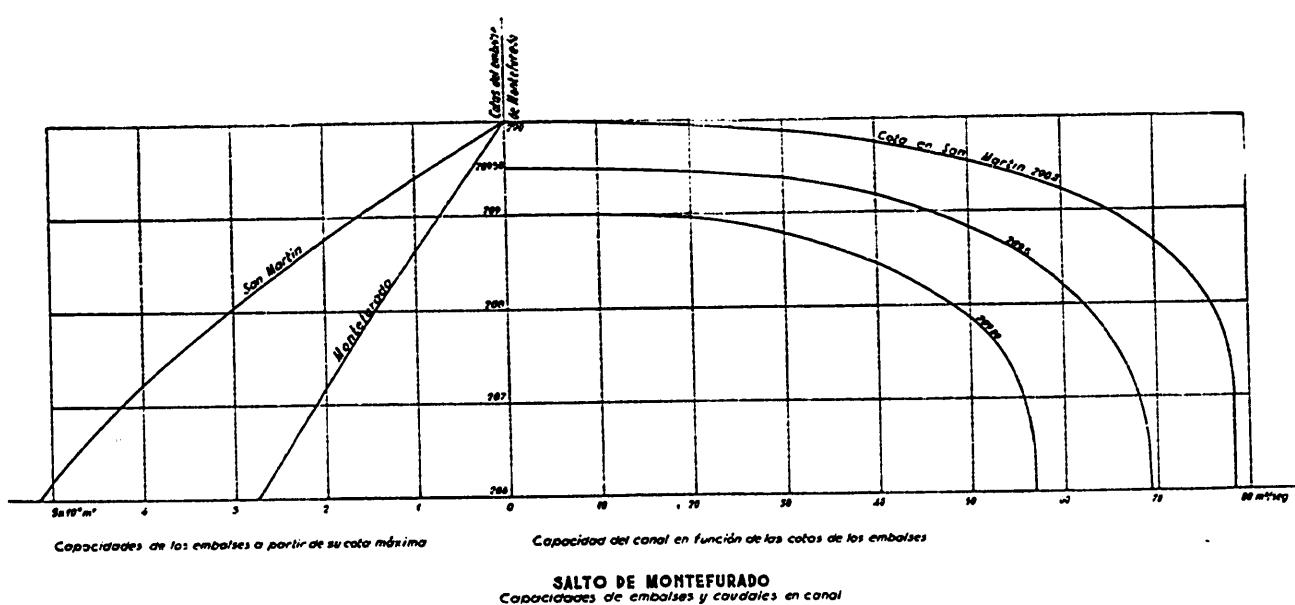


Fig. 15. — Curvas características del canal de Montefurado.

de la base a 5.50 m., se conserva el calado y se aumenta la pendiente del canal a 0.00035. La longitud del canal es relativamente corta y las pendientes reducidas, con lo que el desnivel entre sus extremos es pequeño, lo que permite, manteniendo horizontal la coronación de los muros, controlar el caudal transportado por el canal con el nivel del embalse receptor, sin tener que recurrir a compuerta de regulación en el origen del canal.

Siguiendo el procedimiento de Bakimetteff (Hidráulica de canales), se han calculado las curvas de calados en el canal para diversos caudales y cotas en el embalse origen del canal, obteniendo las cotas correspondientes para cada caso en el embalse receptor del Bibey, teniendo ya en cuenta la recuperación de energía en la desembocadura, deducida de los ensayos en el modelo reducido. En los gráficos de la figura 15 se representan los caudales conducidos por el canal en función de las cotas de ambos embalses.

La velocidad en el segundo tramo del canal, para un caudal de 75 m.³/seg. en régimen permanente y uniforme, será de 2.38 m./seg., que representa una altura cinética de $\frac{2.38^2}{2 \times 9.8} = 0.289$ m., que se perderían en el salto. La potencia perdida correspondiente a las aportaciones de los dos ríos es de 350 Kw., que es de cierta importancia, teniendo en cuenta que la utilización de las máquinas de esta central será superior a las 5 000 horas por año, por lo que consideramos tenía interés tratar de recuperar parcialmente esta energía.

Así como existen numerosos datos sobre tubos de aspiración y sus formas más favorables desde los puntos de vista hidráulico y económico, no hemos encontrado datos sobre la recuperación de energía en difusores a la terminación de cañales con nivel libre de agua, por lo que se decidió estudiar el problema en modelo reducido.

Se ensayaron dos soluciones, llegando a una, adoptada en la obra con resultados satisfactorios (figuras 13 y 14), pues con un caudal de 75 m.³/segundo y diversos calados a la desembocadura del canal en el embalse, la proporción de energía cinética recuperada en el difusor fué la siguiente:

Calados	Tanto por 100 de energía cinética recuperada
3 m.	45.5
4 m.	56.0
5 m.	57.5
6.25 m.	59.0

Con esta recuperación de calado se ganan cerca de un millón de Kw.-h. por año.

En caso de estar vacío el embalse receptor, llega el agua al final del canal en régimen rápido, disponiéndose un trampolin para alejar la lámina de agua de la obra de desembocadura, con objeto de que no pueda socavar sus cimientos. En el modelo reducido se estudió también este caso, observándose que la lámina de agua cae en la ladera suficientemente alejada de la obra.