

Temas de investigación profesional

Acerca de la evacuación de brozas en presas movibles de diversos tipos

Antecedentes.—La evacuación de brozas es una exigencia de los aprovechamientos hidroeléctricos, a fin de evitar los atascos de las turbinas hidráulicas. Las modalidades de la solución técnica dependen de numerosos factores, que no vamos a analizar, para entrar, desde luego, en el caso a que se refiere el epígrafe.

En nuestros grandes ríos, las primeras crecidas de otoño o invierno van acompañadas de arrastres formados por cuerpos del mundo vegetal flotantes en la superficie o entre dos aguas. Estos arrastres tienen a veces gran importancia, pues suponen volúmenes de millares de metros cúbicos.

Se ha tratado de luchar con ellos, primero, utilizando rastrillos, manejados a mano, para limpiar las rejillas, y después, con máquinas potentes. Pero hay casos en que aun los tipos más perfectos que se conocen de tales máquinas resultan insuficientes para dominar la avalancha de brozas que arrastra la crecida.

Un problema de esta naturaleza se ha presentado

aparte de otros motivos, el gran sobre coste de esa solución es suficiente para aconsejar la experimentación, pues en el caso a que nos referimos supone tal tipo de compuertas un sobreprecio de medio millón de pesetas, respecto a las compuertas sencillas desaguantes por el fondo, como las de Mengibar o Car-

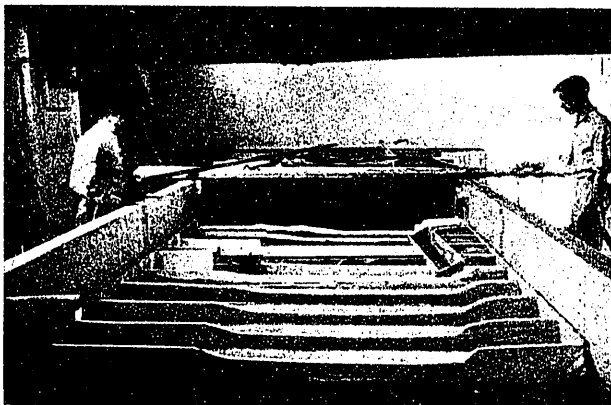


Foto 2
Construcción del modelo: maestras de escayola.

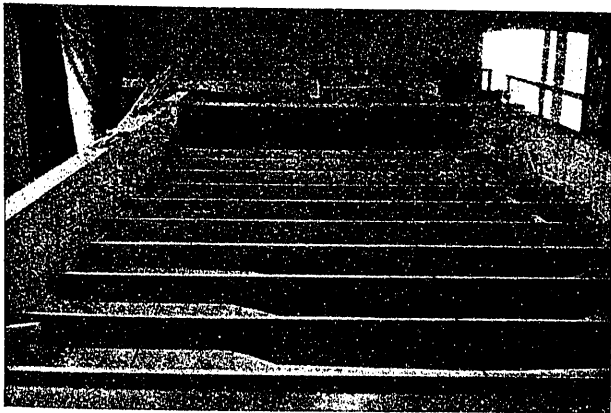


Foto 1
Construcción del modelo: colocación de cerchas.

con motivo del estudio del proyecto de construcción de la instalación de Cantillana, segunda del proyecto de D. Carlos Mendoza para la canalización y aprovechamiento de energía del Guadalquivir entre Córdoba y Sevilla.

Ante la posible insuficiencia de la limpieza mecánica se pensó si habría procedimiento hidráulico que facilitara la evacuación de brozas. Y tenido en cuenta que, debiendo ser por otros motivos la presa de tipo móvil y formada por grandes tableros metálicos móviles entre pilas de fábrica, se decidió estudiar la influencia de éstos en el citado problema, y para ello experimentar en modelo reducido los dos tipos fundamentales de compuertas hoy sancionados: las que desaguan por la parte superior, funcionando como vertedero, y las que desaguan por el fondo.

Pudieran parecer ociosos tales ensayos a la vista de las grandes compuertas mixtas ya construídas, con pleno éxito, y que son capaces de funcionar indistintamente, vertiendo o desaguantando por el fondo. Pero

pio, por ejemplo. Y no son nuestros ríos, con sus regímenes desquiciados, los más a propósito para tolerar gastos superfluos.

El modelo ensayado.—Prevía la oportuna autorización de la Dirección de la Escuela de Ingenieros de Caminos, la Compañía de Canalización y Fuerzas del Guadalquivir ejecutó el modelo necesario para los en-

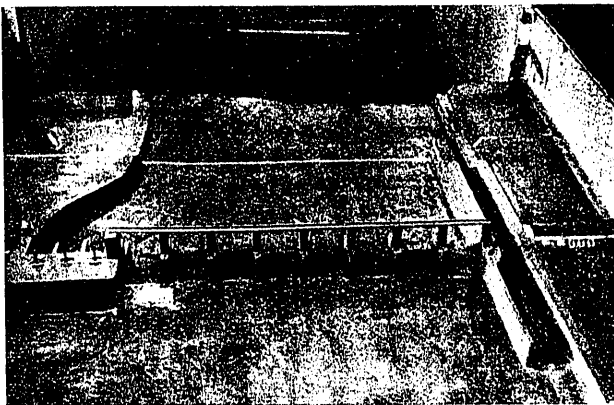


Foto 3
Vista general del modelo desde aguas arriba. Puede apreciarse la central, a la izquierda; la presa de compuertas, en el centro, y la esclusa, a la derecha.

sayos, montándolo en el canal grande del Laboratorio de Hidráulica de la Escuela. Tuvo a su cargo, de una manera directa, este trabajo, como el resto de los ensayos, el ingeniero de Caminos D. Enrique Colás.

El citado canal tiene una anchura de 2 m, y como la obra ocupa un mínimo, en sentido transversal a la corriente, de 250 m, se adoptó como escala para el

modelo la de $\frac{1}{150}$, con la cual quedaba representada la obra en su conjunto y parte de las márgenes. En el sentido longitudinal se representó un tramo de río de 3,50 m en el modelo, o sean 525 m en la realidad. La

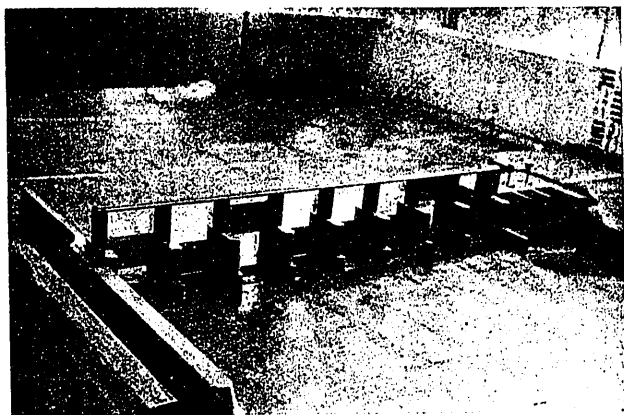


Foto 4
Vista general del modelo desde aguas abajo.

presa viene a estar situada un poco aguas abajo de la mitad correspondiente al tramo representado.

El modelo se construyó sobre un tablero de madera, dentro del canal indicado, y a una altura tal que resultaran cómodas las observaciones y ensayos. Para moldear el modelo sobre ese tablero se construyeron diez cerchas de madera, con perfiles semejantes a los del terreno, cada 50 m, y con dichas cerchas se vaciaron en escayola los perfiles correspondientes, con lo cual se tuvieron ya diez transversales que sirvieron de maestras para la ejecución en hormigón del modelo. Después se vaciaron las maestras y se rellenaron a su vez de hormigón. Se dió una mano de enlucido fino y varias de pintura al óleo para asegurar la impermeabilidad y una rugosidad sensiblemente semejante a la de la Naturaleza, reducida a escala.

Las fotografías números 1 al 4 indican fases de la construcción del modelo. En la número 2 pueden

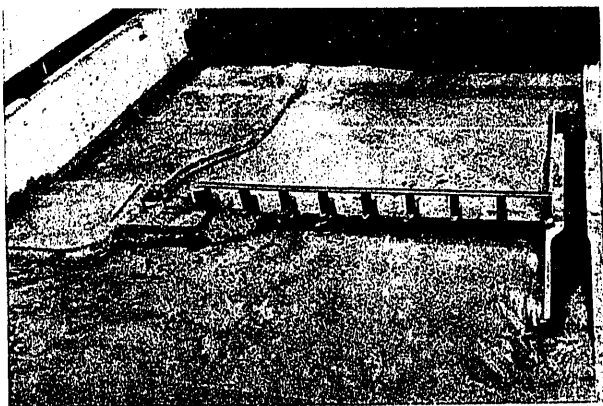


Foto 5
Caudal desaguado por la presa: 150 m³/s. La evacuación se hace por el fondo de la compuerta 1. Delante de ésta, y en la superficie, se forma una gran tortada de brozas; también se acumulan delante de la rejilla de la central.

verse las maestras de escayola a que antes nos hemos referido, así como las cajas, que quedaron en el modelo, para la colocación de la obra de fábrica propiamente, la cual se hizo de madera y se acopló, después de una nivelación cuidadosa, al resto del modelo.

Las compuertas se han reproducido por medio de chapas de cinc de las dimensiones escalares.

Como el nivel del río, aguas abajo, es completamente independiente del de aguas arriba, para conseguir la relación adecuada entre los niveles del agua en dicha parte de aguas abajo de la presa y los caudales correspondientes se utilizó un enrejadillo de pletina, que puede verse en la fotografía 5, al fondo. Esta rejilla viene, por lo tanto, a reproducir el efecto

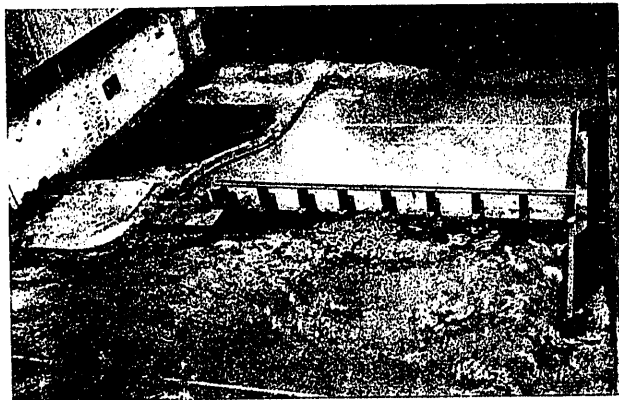


Foto 6
Caudal desaguado por la presa: 150 m³/s. Evacuación, por el fondo de la compuerta 4. Como en el caso de la foto 5, se produce gran acumulación de brozas, tanto delante de la compuerta evacuante como delante de la rejilla.

hidráulico de la parte de río situado aguas abajo, y no reproducido en el modelo. Por los aforos de la División Hidráulica del Guadalquivir se conoce, aproximadamente, la relación entre los caudales y alturas de agua en dicha zona de río, de modo que, abriendo más o menos el énrejado de pletinas, se consigue mantener para cada caudal el nivel correspondiente, aguas abajo de la presa.

De la Central se ha reproducido solamente la re-



Foto 7
Caudal desaguado por la presa: 150 m³/s. La evacuación se hace por mitad entre las compuertas 1 y 2. Respecto a las brozas, son aplicables las observaciones relativas a las fotografías 5 y 6.

jilla, las cámaras de las turbinas y tubos de aspiración, que es, después de todo, lo único que interesa del ensayo. Las turbinas se han representado en el modelo por unos tapones tronco-cónicos, movidos desde el exterior por medio de husillos. La reproducción, como se ve, es notoriamente dispar con la realidad, aun cuando los efectos hidráulicos en la rejilla de toma, que era lo interesante, son prácticamente semejantes.

Todos los ensayos se han ejecutado, supuesto que están funcionando los tres grupos de la Central Hidroeléctrica, a plena carga, o sea, absorbiendo un caudal de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ en su conjunto. Por medio de un ensayo previo se estableció dicho caudal de $150 \text{ m}^3/\text{s}$; es decir, su homólogo reducido, y se regularon los obturadores representativos de las turbinas, de tal manera, que absorbieran justamente el caudal indicado. En esta situación quedaron los tapones para todos los

lativamente pequeños. El mínimo es, naturalmente, el de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, que absorben las tres turbinas. Se han ensayado también caudales de $200 \text{ m}^3/\text{s}$, 250 , 500 , $1\,000$ y $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$. Descontando a todos ellos los $150 \text{ m}^3/\text{s}$ absorbidos por las turbinas, resultan, como

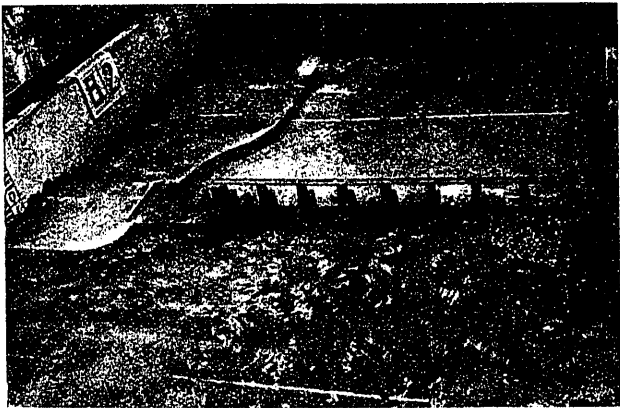


Foto 8
Caudal desaguado por la presa: $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Evacuación por las compuertas 7 y 8, cada una a razón de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ por el fondo. Acumulación de brozas, semejante a los casos de las fotografías 5 a 7.

ensayos ejecutados. De modo que el modelo reproducía la atracción de brozas que ocasionan las turbinas.

Las brozas se han reproducido por serrín de corcho, *confetti* blanco y por palillos de unos pocos centímetros de longitud. El *confetti* representa brozas en la realidad muy grandes, o más bien, tortadas de éstas, pues teniendo, como tienen, unos 6 mm de diámetro, equivalen en la realidad a cuerpos flotantes de $0,90$

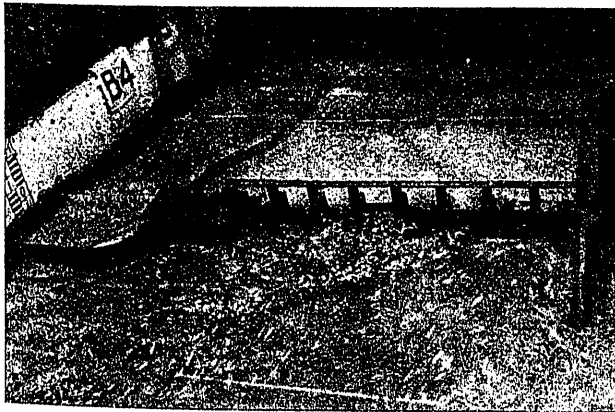


Foto 9
Caudal desaguado por la presa: $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Evacuación, por el fondo de la compuerta 4. Acumulación de brozas delante de la compuerta, y menos delante de la rejilla.

metros de diámetro. Un palillo de 5 cm representa el tronco de un árbol de $7,50 \text{ m}$ de longitud.

El caudal se ha medido por un vertedero normal, que se ha tarado por una de las fórmulas corrientes, midiendo la altura de la lámina vertiente por medio de limnímetros de precisión, que aprecian la décima de milímetro.

Caudales ensayados.—Las brozas se presentan con crecidas medias, aunque en el modelo, y para más garantía, se han comenzado los ensayos por caudales re-

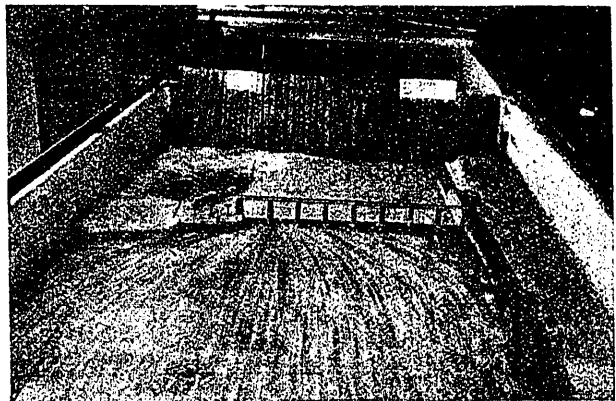


Foto 10
Caudal: $50 \text{ m}^3/\text{s}$, vertiendo por la compuerta 2. Puede apreciarse la diferencia radical con los casos anteriores. Ahora la evacuación de brozas se hace en perfectas condiciones.

evacuados por la presa, los correlativos siguientes: 50 , 100 , 350 , 850 y $1\,850 \text{ m}^3/\text{s}$. Como es sabido, la escala de caudales en modelos reducidos geométricamente a escala $\frac{1}{L}$, es de $\frac{1}{L^{2,5}}$; es decir, en nuestro

caso, $\frac{1}{275\,000}$. De modo que a los caudales totales, indicados anteriormente, les corresponde en el modelo, respectivamente, $0,55$, $0,73$, $0,91$, $1,82$, $3,64$ y $7,28$ litros por segundo.

Conocidas las dimensiones geométricas del vertedero es fácil deducir la altura de lámina vertiente que hay que tener en éste, para que quede establecido el régimen con el caudal deseado.

Ensayos con compuertas desaguantes por el fondo.—Se han efectuado una serie de ensayos correspondientes a los distintos caudales antes indicados y a las distintas combinaciones de abertura de una u otra

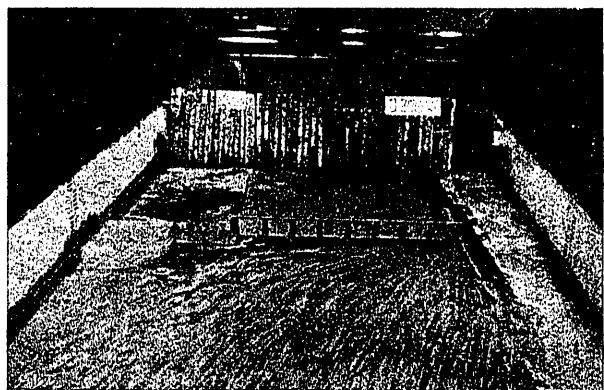


Foto 11
Caudal: $50 \text{ m}^3/\text{s}$, vertiendo por la compuerta 8. Se produce acumulación de brozas delante de la rejilla y compuertas adyacentes, aunque no delante de la compuerta vertiente.

compuerta o de varias de ellas dentro de cada caudal.

No vamos a reproducir los resultados de cada una de las observaciones, sino que nos limitamos a presentar en las fotografías las más características (números 5 al 9).

En todas ellas puede apreciarse la aparente paradoja de que las brozas se amontonan y detengan precisamente delante de la compuerta que esté abierta. Así, en la fotografía 5 puede apreciarse una plasta de brozas delante de la compuerta 1 (numeramos las

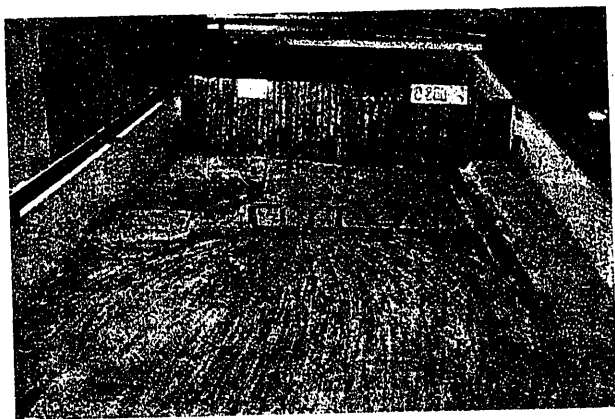


Foto 12
Caudal: 50 m³/s, vertido por las compuertas 1 y 2.
Rejilla limpia de brozas.

compuertas a partir de la Central hacia la derecha, según las contaría un observador situado en el eje del río al que le entrara la corriente por la espalda y estuviera cara a la presa).

En la fotografía 6, las brozas se acumulan principalmente delante de la compuerta 4, que es la abierta, y lo mismo se aprecia en las restantes.

Desde el punto de vista que interesa, de limpiar de brozas las rejillas de la Central, ya se aprecia en dichas fotografías que especialmente es mala solución abrir las compuertas inmediatas a la Central, y algo mejor abrir las del extremo opuesto.

La fotografía número 9 representa la evacuación de 350 m³/s por la presa, en una forma totalmente inadmisibles para la explotación, pues se evacua todo este caudal sólo por una compuerta, que en el caso de la fotografía citada es la número 4. También se aprecia que ni aun así se consigue una buena eva-



Foto 13
Caudal: 50 m³/s, vertido por las compuertas 1 y 3, a razón de 25 m³/s cada una. Pequeña acumulación de brozas delante de 2.

ción de brozas, aunque justo es consignar que no queden muchas delante de las rejillas.

Los remolinos de succión.—Es curioso observar que toda la evacuación de brozas con compuertas desagüantes por el fondo la realizan unos remolinos de

succión de eje vertical que se forman inmediatamente delante de la compuerta abierta y en el lado en que las compuertas laterales están cerradas. Este remolino va adquiriendo más importancia a medida que la abertura de la compuerta es mayor, y es, como decimos, el único medio para la evacuación de brozas por compuertas desagüantes por el fondo.

El remolino presenta la superficie con una pequeña caída hacia su vértice en forma de embudo, de modo

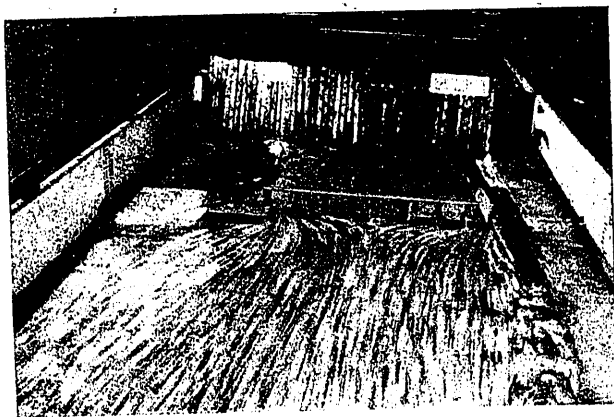


Foto 14
Caudal: 50 m³/s, vertiendo, igualmente, por las compuertas 1 y 8. Resulta muy visible la trayectoria de las brozas y cómo quedan éstas reunidas, en pequeña cantidad, delante de la compuerta 4, en una zona de agua estancada situada entre las dos corrientes evacuatorias.

que las brozas arrastradas por la corriente general, cuando llegan a la zona inmediata a aquél, tienden a ser tragadas por el mismo, aunque previamente las somete a un giro de velocidades considerables, hasta que por fin son absorbidas.

Pero para que el remolino pueda llegar a funcionar, como medio hidráulico evacuante de las brozas, es preciso que éstas no lleguen a él en una cantidad excesivamente grande y formen una plasta sobre el mis-



Foto 15
Caudal: 100 m³/s, vertido por las compuertas 1 y 2. Perfecta limpieza de brozas de la rejilla.

mo, porque entonces dicha plasta de brozas superficiales forma una especie de freno que impide el giro del remolino y, por lo tanto, la succión de las brozas por el mismo.

Tales remolinos de succión pueden también observarse en la realidad, y entonces es fácil darse cuenta que presentan una forma helicoidal, de profundidad relativamente considerable, cuya superficie viene a ser como si un gran tornillo vertical hubiera dejado in-

presa la huella de su forma dentro de la masa líquida.

Compuertas-vertedero.—En las fotografías 10 a 14 se representa la evacuación de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, vertiendo por una sola compuerta o por dos de la presa. En dichas fotografías puede apreciarse el aspecto totalmente distinto que presenta el fenómeno de la evacuación en este caso con respecto a las compuertas desagüantes por el fondo. Las brozas se evacúan mucho mejor que en el caso anterior, y hasta el solo caudal mencionado

más como compuertas sencillas de una hoja que desagüaran por el fondo.

Las fotografías 19 a 21 representan el caso indicado cuando se desagüan $50 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada una de las compuertas 1 y 2, y el resto, o sean $250 \text{ m}^3/\text{s}$, bien

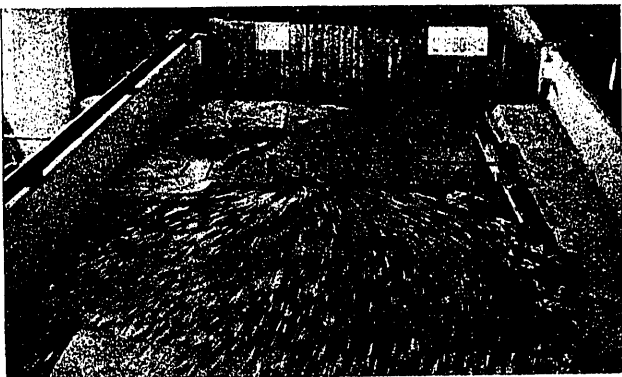


Foto 16
Caudal: $100 \text{ m}^3/\text{s}$, que vierten, igualmente, las compuertas 1 y 3. Rejilla limpia. Acumulación de brozas delante de la compuerta 2 (en pequeña cantidad) y de las extremas de la derecha.

para mantener limpias las rejillas si la compuerta que vierte es alguna de las inmediatas a éstas. Así se aprecia en las fotografías 10, 12 y 13, en las cuales está abierta la compuerta 1, o ésta con la 2 ó la 3. Cuando vierte la compuerta 8 quedan algunas brozas delante de las rejillas de la Central.

Las fotografías 15 a 18 corresponden a un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ vertidos por dos de las compuertas de la presa. Desde el punto de vista práctico de la limpieza

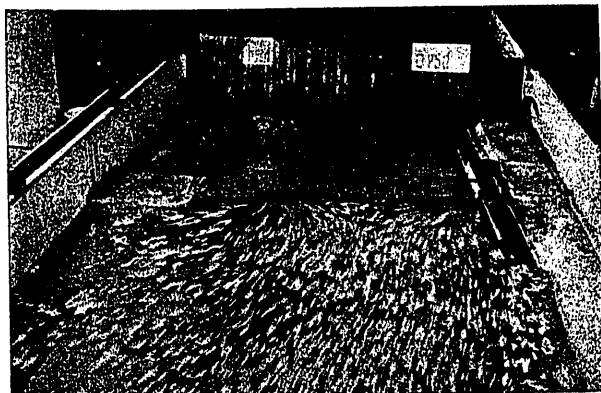


Foto 17
Caudal: $100 \text{ m}^3/\text{s}$, vertido por iguales partes por las compuertas 1 y 8. Acumulación de brozas en el centro de la presa y, en pequeña cantidad, en un extremo de la rejilla.

de las rejillas, la mejor solución es la que indica la fotografía 15, de evacuación del caudal vertiendo por las compuertas 1 y 2.

Sería interesante también observar el fenómeno cuando parte del caudal se evacuara vertiendo y parte por el fondo. El asunto tiene interés práctico, porque si de esa manera es posible evacuar bien las brozas y mantener limpias las rejillas, podrían reducirse las compuertas vertientes a unas cuantas, dejando las de

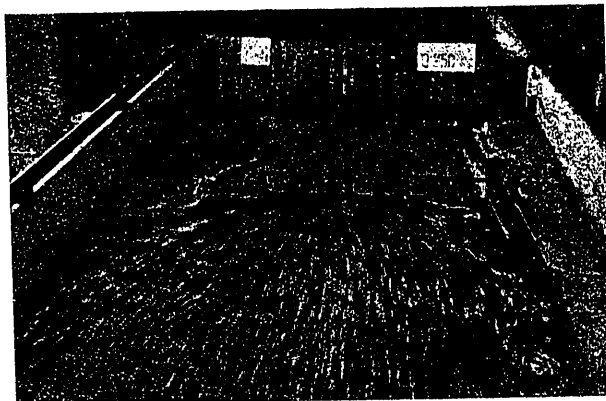


Foto 18
Caudal $100 \text{ m}^3/\text{s}$, que vierten las compuertas 2 y 3.

por el fondo de una sola compuerta o bien por el de varias. Dichas fotografías demuestran claramente la perfecta evacuación de brozas en dichos casos y la conservación limpia de la rejilla.

Se han ensayado también los caudales de $850 \text{ m}^3/\text{s}$ evacuados por la presa, siendo 100 de ellos vertidos por las compuertas 1 y 2. Las fotografías 22 y 23 indican algunos de los casos estudiados, y es curioso observar aquí la gran deformación superficial del nivel del agua y la formación de una gran plasta de brozas delante de las compuertas cerradas, desagüantes por el fondo. Esta gran plasta de brozas se forma en un sitio no perjudicial a la explotación, pues en la esquina opuesta a la Central. Esta aparece, como en los casos anteriores, perfectamente limpia de brozas, cuando las compuertas vertientes son las inmediatas a ella.

Conclusiones.—Como resumen de cuanto antece-

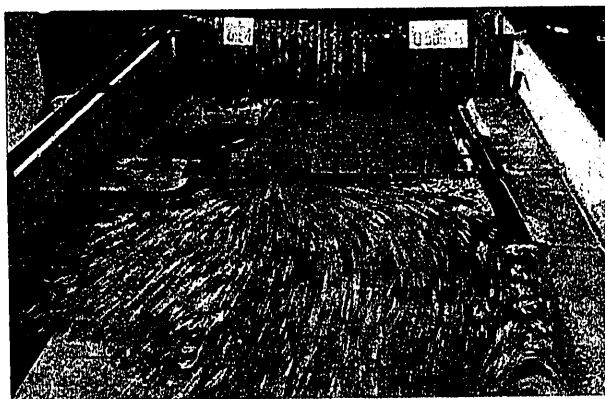


Foto 19
Caudal desagüado por la presa: $350 \text{ m}^3/\text{s}$; de ellos, 50 vertiendo por cada una de las compuertas 1 y 2, y el resto, de $250 \text{ m}^3/\text{s}$, por el fondo de la 8. Rejilla prácticamente limpia. Acumulación no perjudicial de brozas delante de 7 y 8.

de, entiendo pueden formularse las conclusiones siguientes:

1.º Las brozas flotantes se evacúan mucho mejor por una compuerta-vertedero que por una desagüante por el fondo.

2.º Bastan caudales relativamente pequeños (en nuestros ensayos, del orden de $\frac{1}{6}$ a $\frac{1}{10}$ del caudal utilizado por las turbinas) para evacuar, hidráulicamente, las brozas arrastradas por el río y para mantener limpias las rejillas de la toma.

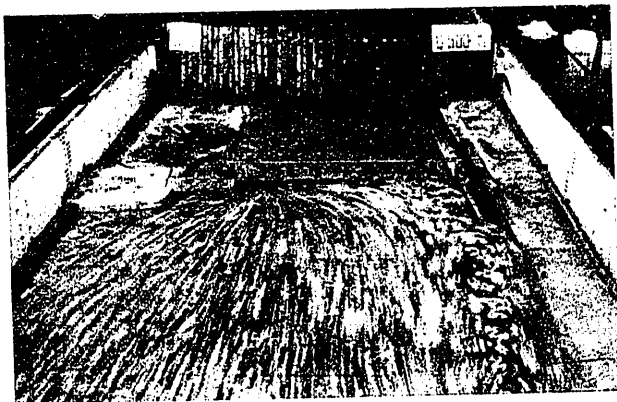


Foto 20
Caudal desaguado por la presa: 350 m³/s; de ellos, 50 vertiendo por cada una de las compuertas 1 y 2, y el resto, por el fondo de 3, 4 y 5.

3.º Es posible alcanzar tales resultados cuando las compuertas vertientes están situadas inmediatas a la toma que se desea mantener limpia de brozas.

4.º Es asimismo posible mantener limpia la toma con dichas compuertas-vertedero sitas junto a aquélla, y aun con caudales de grandes crecidas, evacuando los caudales restantes por el fondo de otras compuertas.

5.º Si todas las compuertas desaguan por el fondo, sólo se consigue la evacuación de brozas cuando se forma un torbellino hidráulico de potencia suficiente para absorber el caudal de brozas arrastradas por el río. Si el caudal de brozas que aporta la corriente es mayor que el que evacue el remolino, pueden llegar a formarse grandes plastas que frenen el torbellino, lo paralicen y anulen totalmente su capacidad eva-

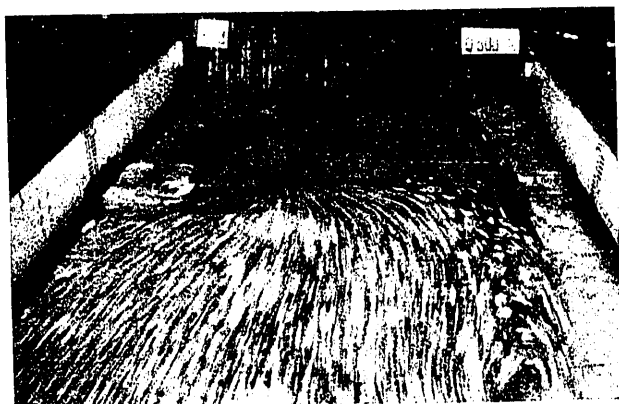


Foto 21
Caudal desaguado por la presa: 350 m³/s, de los cuales vierten 100 por 1 y 2 en partes iguales, y 250 se evacuan por el fondo de las 3, 4, 5 y 6. Acumulación de brozas, como en los casos de las fotos 19 y 20, delante de las compuertas extremas de la derecha. Rejilla también limpia, como en dichos casos.

toria. Se facilita la formación de tales torbellinos manteniendo una gran diferencia de abertura entre una compuerta y sus adyacentes. Pero esta forma de evacuar los caudales es totalmente inadmisibles, en ge-

neral, si se han de evitar grandes socavaciones al pie de la presa; de modo que únicamente sería tolerable cuando previamente se hubieran previsto las obras en consecuencia o se tratara de un lecho de roca insocavable.

6.º Recomendamos, por tanto, como solución suficiente el de presa mixta, con una o dos compuertas dotadas de alzas, que puedan abatirse de tal manera.

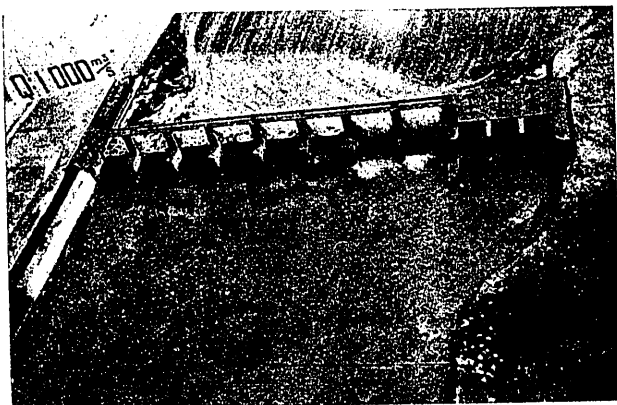


Foto 22
Caudal desaguado por la presa: 850 m³/s, y, como en todos los casos anteriores y siguientes (fotos 1 a 25), otros 150 metros cúbicos por segundo por las turbinas, que hacen un total de 1 000 m³/s. De aquéllos, vierten 100 entre 1 y 2, y el resto, de 750 m³/s, por el fondo, e igualmente entre sí las compuertas 3, 4, 5 y 6. Vista desde aguas abajo. Es apreciable la perfecta limpieza de brozas delante de la rejilla y la gran acumulación de éstas delante de las compuertas desaguantes por el fondo, especialmente de las más alejadas de las compuertas vertientes.

que esa o esas compuertas funcionen como vertedero para la fácil evacuación de las brozas.

Estas compuertas de alza deben situarse junto a la toma que se desee mantener limpia de brozas. Las otras compuertas pueden ser sencillas, dé una hoja y desaguantes por el fondo.

Esta solución tiene también ventajas desde otros puntos de vista, como es por el hecho de facilitar la



Foto 23
Vista semejante a la anterior, pero desde aguas arriba y desaguando por el fondo las compuertas 5, 6, 7 y 8, en lugar de las indicadas en la foto precedente.

regulación del caudal evacuado de modo más fácil que por compuertas desaguantes por el fondo, debido a que el incremento de caudal evacuado correspondiente a un determinado desplazamiento del alza o de la parte superior de la compuerta es mucho más pequeño en la de vertedero que en la compuerta desaguante por el fondo.

7.º Supuesto adoptada la solución indicada en el

párrafo precedente, la regulación del caudal evacuado por la presa debe hacerse: maniobrando primero una sola de las alzas, con preferencia la de la compuerta inmediata a la toma, lo cual podrá hacerse hasta alcanzar la capacidad evacuatoria de tal compuerta. Agotada ésta, deberá empezarse a regular con el alza de la compuerta-vertedero inmediata, si es que hay dos montadas, y, como anteriormente, hasta agotar su capacidad evacuatoria. Si el caudal a desaguar ex-

Los ensayos de referencia, ejecutados en las vacaciones estivales de la Escuela de Ingenieros de Caminos, se han repetido por los alumnos de cuarto año del curso corriente, a título de práctica y a fin de que con tal ejemplo pudieran darse cuenta de la impor-

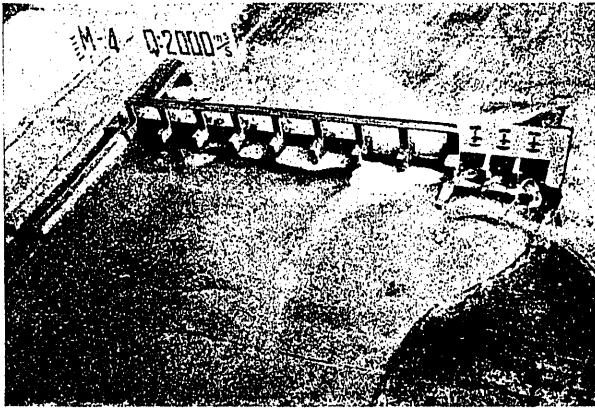


Foto 24
Caudal de 1 850 m³/s por la presa. Acumulación de brozas aguas arriba y aguas abajo de la presa, pero alejada de la central. Vista desde aguas abajo.

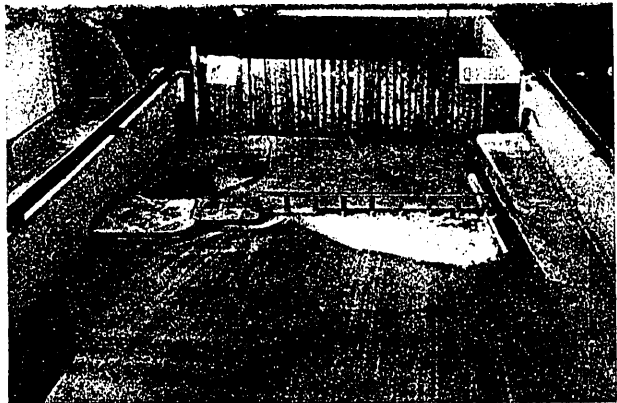


Foto 25
Caudal de 1 850 m³/s por la presa. Acumulación de brozas aguas arriba y aguas abajo de la presa, pero alejada de la central. Vista desde aguas arriba.

cediera del anterior lo suficiente, debe desaguar por el fondo de las otras compuertas del modo más igual posible.

* * *

tancia de la experimentación hidráulica y aprendieran sus métodos operatorios.

La Escuela de Ingenieros de Caminos viene dedicando especial atención a estas cuestiones, mejorando y completando las instalaciones de su Laboratorio de Hidráulica, que hoy se encuentra en condiciones de prestar un servicio interesante a la enseñanza y a la profesión en asuntos sencillos como el relatado.

A. DEL AGUILA
Profesor de la Escuela
de Ingenieros de Caminos

Fotoelasticimetría¹

El Laboratorio de la Escuela de «Ponts et Chaussées», París²

A este laboratorio le corresponde la prioridad, pues, como ya vimos en el artículo anterior, fué Mesnager quien primero dió una solución definitiva al problema de investigación fotoelástica para los casos de sollicitación en dos dimensiones. Esto fué en 1900, y desde entonces se han llevado a cabo interesantes experiencias bajo la dirección del citado Mesnager, con la colaboración de los ingenieros Belawsky, Marcotte y Tesar. Este último es el actual encargado de las investigaciones que se verifican en la sección correspondiente del Laboratorio de Mecánica de la Escuela de «Ponts et Chaussées».

El método empleado es el de Mesnager, o sea: utilización de las líneas isoclinas y las isocromáticas, determinando el valor absoluto de estas últimas mediante compensador y obteniendo la segunda relación entre las tensiones principales, por medición del cam-

bio de espesor de la placa con un aparato denominado *latómetro*.

En la foto número 1 aparece el aparato de polari-



Fig. 1. Aparato de polarización.

¹ Véase el número anterior, página 29.

² Debemos la información del presente artículo a los señores Marcotte y Tesar, respectivamente, director del Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ponts et Chaussées, y director del Laboratorio de Fotoelasticidad en dicho departamento.