

Apuntes sobre marcos de escurrimiento crítico

POR

FRANCISCO JAVIER DOMÍNGUEZ S.

En la zona central de nuestro país son muchos los agricultores que pelean por agua: este precioso elemento que da vida a sus campos, es la constante preocupación del hacendado que ya se imagina al vecino valiéndose de ardides para llevarle más agua de la que le pertenece, como a su vez los inventa sutiles y acomodados de la mejor manera a la moral para lograr ventajas en la repartición de ella. ¿Dónde está la causa de este mal general? Creemos que no hay necesidad de profundizar mucho para encontrarla. Por un lado ella escasea, porque los caudales de los ríos, sobrados en total, no se adaptan en sus variaciones a las necesidades de la agricultura y en segundo lugar, los partidores que deben entregarla conforme a derechos, pagados con elevadas sumas, lo hacen pésimamente. Fundos hay con derecho a un número subido de regadores, que anualmente ocasionan fuertes desembolsos, proporcionales a sus derechos, por limpias y mantenimientos de canales que se embancan inmensamente y en cambio reciben, gracias a un mal ideado partidor, la mitad, la tercera parte apenas, de sus derechos en agua. Conocemos marcos establecidos de antaño con error de partición de 150%, otros que canalizan larga extensión, casi media cuadra del canal, con el objeto de regularizar la corriente y no se cuidan de compuertas inmediatas al término de la canalización en uno de los ramales. Todos estamos convencidos de la ausencia de partidores exactos entre los más en uso y sabemos igualmente que ellos carecen de principio racional. Ingenieros eminentes han tratado de corregir el partidor inicial del Canal de Maipo, pero a nuestro juicio, si no han llegado a la meta es porque no han colocado el problema en su verdadero terreno. Partir un canal es siempre un problema de escurrimiento variado y todas las soluciones antiguas que conocemos (la pared curva o desplome, que busca proporcionalidad de radios medios a derechos; troneras de pared que igualan niveles de los salientes, etc.) están fundadas, en el escurrimiento uniforme. ¿Y cómo se puede pretender conseguirlo en un marco partidor, que es una singularidad, cuando para ello es menester largo rozo, quizás kilómetros, con constancia de pendientes y sección? Además no de-

terminan el gasto de las salientes esa serie de modificaciones, por decirlo así, simplemente externas, y aquí es lo esencial la distribución del gasto. La única solución verdadera de la partición proporcional con gasto variable es aquella que logre que las velocidades sean iguales en todo el ancho del canal entrante en la sección de partición.

Trataremos de reunir en este estudio el fundamento científico y práctico de dos partidores de concepción moderna cuyos resultados sorprendentes los van imponiendo. No pretendemos dar a conocer algo nuevo, sino como decimos, simplemente reunir de una manera sucinta, pero en lo posible completa, cuanto merezca interés respecto a los marcos de barrera y angostamiento.

En una corriente descubierta, de escurrimiento permanente, si se coloca una barrera o se hace un angostamiento local se observa que el eje hidráulico se deprime sobre la barrera o en la parte angosta. Este fenómeno nos acusa, rigiendo la ley hidrostática, despreciando los frotamientos en el corto trozo de la singularidad y por lo tanto supuesta la constancia de la carga o suma de Bernoulli, que una parte de la altura de agua se ha convertido en altura de velocidad. En otras palabras todos los filetes líquidos han recibido un igual suplemento de energía cinética, cuya expresión es por unidad de peso, como se sabe, es $\frac{V^2}{2g}$. Este incremento, proporcional a un cuadrado de velocidad, por igual para todos los filetes, demuestra que las diferencias que existían entre las distintas velocidades de la corriente antes de la aceleración, disminuyen de importancia relativa cuando ella se ha acelerado, o sea, se produce una regularización de velocidades. (El fenómeno inverso se origina si la aceleración es negativa).

Si la barrera es suficientemente alta o el angostamiento bastante pronunciado para que la altura de velocidad sea la mitad de la altura de agua, habremos logrado que las variaciones de aguas abajo no influyan aguas arriba de la singularidad, pues tal es la condición de escurrimiento crítico o sea del paso de régimen de río a torrente (1).

Si seguimos aumentando la altura de barrera o disminuyendo el ancho de la angostura provocaremos quizás un escurrimiento torrencial aguas abajo, pero

(1) No entraremos en definiciones a este respecto que pueden verse con detalles en Salas Edwards «Eскурrimiento variado del agua en los canales» y en «Proceedings of the second Pan American Scientific Congress Vol. VI págs. 784 a 790.

en la singularidad seguirá subsistiendo la condición antes dicha $\frac{V^2}{2g} = \frac{H}{2}$ (1).

Para obtener esta condición de aislamiento es necesario conocer las condiciones de aguas abajo.

Estos son pues, sintéticamente, los fundamentos de los marcos de barrera y angostamiento que vamos a tratar en particular más detalladamente.

El problema del marco partidor consiste en dividir un canal de gasto variable en otros dos, cuyos gastos guarden en todo momento entre sí la razón de sus derechos o acciones M y N. La naturaleza de paredes, radio medio, etc., de los derivados sean cualesquiera, pero conocida por el cálculo o por aforos directos la suma de Bernoulli que corresponde a cada gasto en cada ramal. Esas funciones de los gastos parciales $B_M = (f) Q_M$; $B_N = (f) Q_N$ son siempre fáciles de obtener.

Marco de Barrera

La barrera de mayor altura es la que corresponde, por lo general, al mayor gasto y por lo tanto al Bernoulli máximo. Así pues, la suma de Bernoulli que sea mayor entre las dos correspondientes a los gastos máximos parciales, (Q_M máximo y Q_N máximo), servirá para el cálculo del marco.

La altura a de barrera se obtiene por una simple aplicación del teorema de

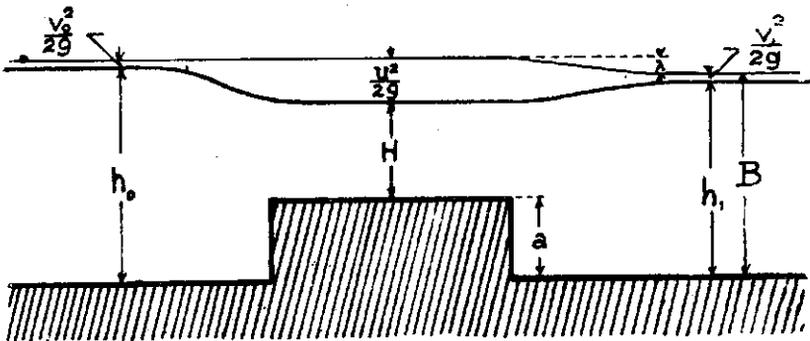


fig. 1

Bernoulli entre la sección de salida y la de la barrera, poniendo por condición que sobre la barrera se produzca el escurrimiento crítico y haciendo hipótesis sobre el valor numérico de la pérdida de carga λ , que la barrera produce. Se tiene tomando el fondo, supuesto horizontal como plano de referencia. (fig. 1)

(1) En esta y en las expresiones siguientes, en general $H = \frac{\omega}{1}$; ω sección mojada y 1 ancho superficial; H es la altura de agua en sección rectangular; por lo tanto las fórmulas que sentamos valen especialmente en ese caso, que es el de la práctica.

$$B + \lambda = a + \frac{3}{2} H.$$

El valor de H , altura crítica lo obtenemos del gasto por metro de ancho, de la expresión:

$$Q = H \sqrt{gH}; \text{ de donde } H = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g}} \quad (1)$$

Se tienen despejando:

$$a = B + \lambda - \frac{3}{2} H$$

De esta expresión conocemos a B como hemos dicho y sabemos calcular H función únicamente del gasto; nos queda la apreciación de λ . No conviene de ninguna manera exagerar el valor de la pérdida de carga, porque se llegaría a barreras de altura sobrada, y por lo tanto a remansos inútiles aguas arriba, que no siempre se pueden proyectar. No la estimamos, en general, nunca superior a una vez la altura de velocidad crítica. En un caso concreto, de eje hidráulico semejante al de la fig. 1, (es decir, de simple depresión sobre la barrera) el valor total de la pérdida de carga medido por la diferencia de cotas del plano de carga entre aguas arriba y aguas abajo de la barrera era de 40% de la altura de velocidad crítica. Se puede valer de varios procedimientos analíticos, para llegar a valores de λ , pero en la práctica tan seguro y más sencillo nos parece tomar simplemente de $\frac{1}{2}$ a una vez la altura de velocidad crítica, estando así seguros de obtener la crisis sobre la barrera.

Respecto a las condiciones de establecimiento de este tipo de partidores nos ocuparemos primeramente de las condiciones generales y en seguida de la forma de barrera, colocación y forma de la punta partidora y por último de la repartición de velocidades sobre la barrera.

Debe elegirse un trozo recto para colocar el marco y regularizar la cuneta del entrante, pues ambas condiciones influirán en la simetría de la repartición de las velocidades, eliminando de ante mano la posibilidad de una desproporción en dicha repartición, por choques etc. que pudiera hacerse notar aún después de acelerada la corriente.

Los derivados pueden, como se ha dicho, establecerse de cualquier manera, enteramente diversas entre sí, siempre que para el cálculo de la altura de barrera

(1). o de la expresión $Q = 0.7 H \sqrt{2gH}$ etc. Consúltese Salas Edwards. Esgurrimiento variado del agua en los canales págs. 49 y siguientes.

se tomen en cuenta esas condiciones. Hay muchos ejemplos de salientes que se derivan en ángulo recto.

La barrera ha sido construida de dos formas: o bien es una barrera propiamente tal que se eleva del fondo del canal (como en la figura 1) o se trata de una caída o grada de fondo. En ambos casos pueden tener paramentos verticales o afectar la forma de chaflán. A nuestro juicio debe obtenerse por el primer tipo pues aunque se produzcan embancamientos (que tienden a asemejarlo al segundo) siempre la aceleración de la corriente será más brusca, circunstancia que influye en

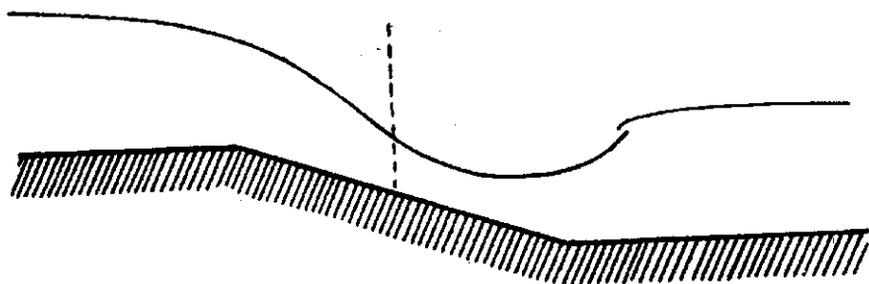


Fig. 2

la regularización de las velocidades. Con grada de fondo se tiene antes de la caída un río deprimido cuya aceleración paulatina da lugar a que los frotamientos parietales retarden, como en régimen uniforme, los filetes inmediatos. En caso de grada para lograr una rápida aceleración, hay que exagerar la altura de caída, provocando un torrente sobre el plano inclinado (fig. 2). Por lo demás, el marco de este tipo con grada de fondo desperdicia cota en mucho mayor proporción que la simple barrera. Es, sin embargo, indudable que en algunos casos está justificado, pues son muchos los agricultores rehacios a que se ponga un «taco» en su canal, como hemos tenido ocasión de encontrar.

Tratándose de aguas turbias, los embancamientos se depositarán en abundancia aguas arriba de la barrera propiamente tal, pero bien mirado, fuera del inconveniente ya anotado de tender a hacer paulatina en vez de rápida la aceleración, respecto a las limpias anuales, es una ventaja, puesto que se acumula en un punto un material que en caso contrario habría que recojer en larga extensión.

La punta partidora debe colocarse donde sean más iguales las velocidades por efecto de la aceleración, y en la sección crítica, donde se anulan las influencias de aguas abajo. En la práctica nos parece que habría que distinguir según sea la forma de la barrera y la del eje hidráulico de los ramales, no teniendo en realidad importancia decisiva, pues basta proyectar una barrera de altura sobrada o bien alargada en el sentido del escurrimiento (unas tres veces la napa de altura máxima,

por ejemplo) y adelantar la punta partidora a la mitad de ella, para estar a cubierto; sin embargo, trataremos de discutir brevemente la colocación de la punta partidora en los dos tipos de barrera, poniéndonos en los casos posibles de ejes hidráulicos de los ramales, para hablar ocasionalmente de ellos.

En una barrera de sección rectangular cuyos ramales se desprenden con igual

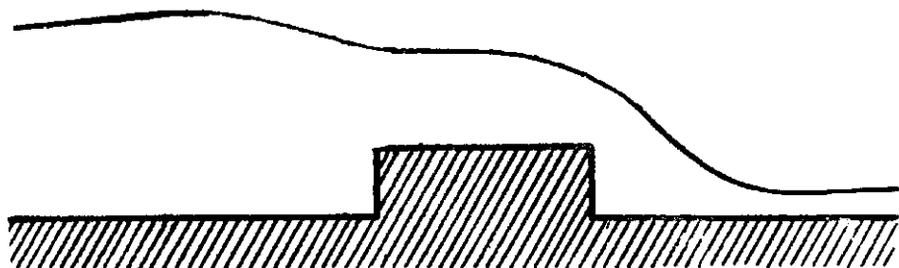


fig. 3

eje hidráulico, sea éste torrencial (fig. 3) hacia aguas abajo o en forma de río con peralte (fig. 1) o sin él (fig. 4), como la aceleración ha sido brusca, sobre toda la barrera se obtendrá la igualdad de velocidades con más o menos idéntico efecto. En este supuesto, si ambos ramales son ríos con peralte, la colocación de la punta parti-

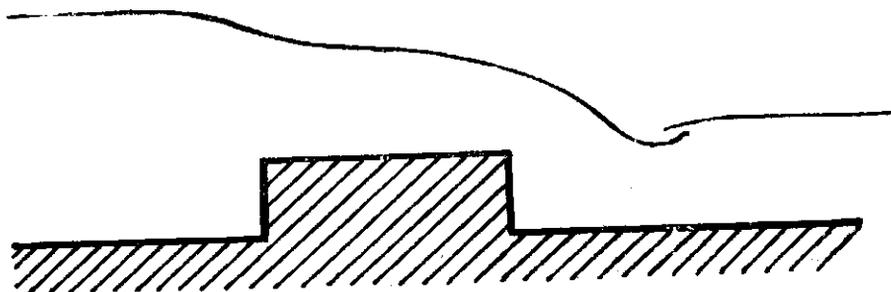


fig. 4

dora debería ser regida por la sección de escurrimiento crítico; por lo tanto, cuando se prevé este caso haciendo la barrera larga en el sentido de la corriente, se estará seguro de la producción de la crisis en una buena extensión sobre ella. La punta partidora debe pues internarse sobre la barrera una vez la altura de la na-

pa máxima, por ejemplo. Si ambos ejes son torrenciales o ríos cuya superficie libre es de cota más baja que la de la napa sobre la barrera (fig. 4) teniendo en cuenta la misma observación respecto a la repartición de velocidades, se notará además que si bien es cierto la sección crítica se encuentra un poco hacia aguas arriba del fin de la barrera (1), no interesa ya colocar la punta partidora en dicha sección, pues no hay peligro de influencias de aguas abajo, por las condiciones mismas de escurrimiento de los ramales. Por lo tanto, si ambos ejes de los ramales, idénticos entre sí, son ríos más bajos que la napa sobre la barrera o de régimen torrencial, no tiene gran trascendencia la colocación de la punta partidora; puede ir al fin de la barrera, aunque conviene siempre internarla un poco para tener una sección de partición bien definida.

Con la misma forma de barrera que venimos considerando, pero con ejes hidráulicos desiguales en los ramales por ejemplo, una torrente y el otro río, caso que hemos visto realizado. Si estas son las circunstancias del marco que se proyecta es cuando más conviene alargar la barrera en el sentido de la corriente,

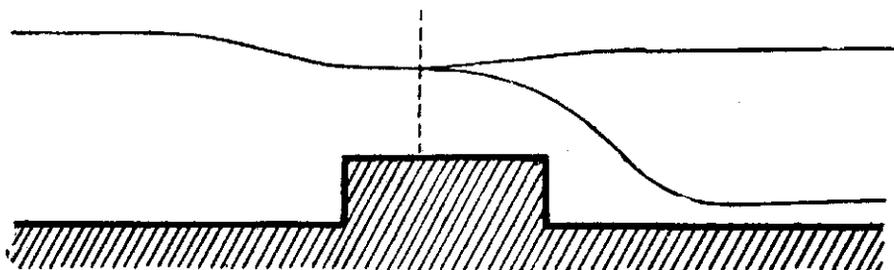


fig. 5

para obtener los filetes paralelos en la sección de la punta partidora. En tal caso habría que adelantar, relativamente más que en los anteriores, hacia aguas arriba la punta partidora. También exagerando la altura de la barrera se hace un lado la dificultad, pues se cae en el caso de un ramal torrencial y el otro río más bajo que la superficie libre sobre la barrera, idéntico al anterior.

Siempre por puntos escalonados, conociendo el fondo, cuneta, naturaleza de paredes y el gasto, se puede construir el eje hidráulico hasta el pie de la barrera que se proyecta y por lo tanto resolver en cada caso concreto la situación de la punta partidora sobre la barrera. Naturalmente es más sencillo simplemente au-

(1) Según don Ramón Salas Edwards, obra citada pág. 47, en nueve caídas de las experiencias de Bazin el escurrimiento crítico se adelanta hacia aguas arriba una distancia que varía de 3 a 6 veces la profundidad crítica. En el caso que nos ocupa creemos que el adelanto será muchísimo menor. Con altura crítica 0.29 la hemos encontrado adelantada 0.40 m.

mentar la altura de barrera, siendo solución más elegante y en general más conveniente no hacerlo.

Si la barrera es en forma de caída de fondo ya se ha señalado que debe exagerarse un tanto su altura para obtener una aceleración rápida de la corriente, conviene en ese caso colocar la punta partidora un poco más aguas abajo del comienzo de la caída, en pleno torrente (línea vertical de segmentos de la fig. 2). En estas condiciones no hay que preocuparse del eje hidráulico de los ramales.

La punta partidora debe hacerse en forma de lámina delgada pues así los filetes líquidos no sufrirán desviación en la sección de partición.

Hemos dicho que gracias a la aceleración de la corriente en los marcos de escurrimiento crítico se regularizan las velocidades, es ésta la condición esencial de ellos y para lograrla no es necesario llegar a la crisis de la corriente, necesaria por otro lado para impedir que cambios aguas abajo (como los originados por compuertas que se abren o cierran) alteren la partición. Sobre barreras carecemos de experiencias prolijas y numerosas, que poseemos sobre angostamientos para darnos cuenta racional de esta excelente propiedad, pero trataremos de hacerlo con las que hay.

En la fig. 6 damos el gráfico de tres aforos hechos sobre barreras en la sección de la punta partidora; las barreras son de 0.30 m. la primera o 0.40 m. las otras dos, de un metro de largo en el sentido del escurrimiento, internándose la punta 0.40 m. sobre la barrera.

Las velocidades sobre la barrera son mucho más regulares que en escurrimiento uniforme, como puede verse en la fig. 6. Así la razón $\frac{U}{V}$ entre la velocidad media y la máxima que en escurrimiento uniforme sabemos según Bazin vale de 0.75 a 0.85 según la rugosidad de la pared; en la rápida aceleración de la barrera sube en los tres aforos que presentamos según el siguiente cuadro:

Aforo	U	V	$\frac{U}{V}$
1	1.706	1.75	0.97
2	1.51	1.60	0.94
3	1.72	1.733	0.99

Se nos dirá que son escasas las experiencias, pero habrá que reconocer que los valores de la razón $\frac{U}{V}$ que ellas arrojan son inconfundibles con los de escurrimiento uniforme en cualquier clase de pared, y muy reveladores.

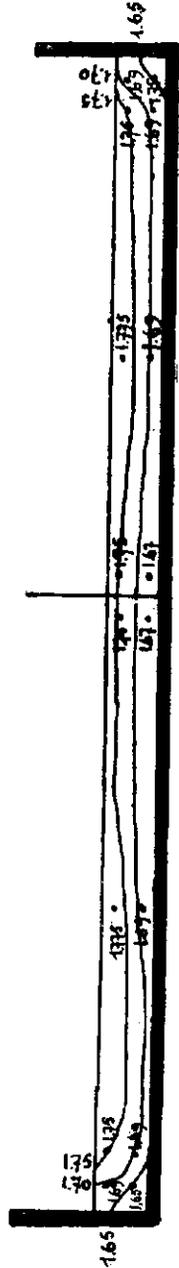
Sensible es no poder presentar cálculos del coeficiente α , (correctivo de la



(1.)



(2.)



(3.)

fig. 6

altura de velocidad media para obtener la energía cinética total de la corriente); pues creemos no se han experimentado sobre barrera; lo podremos hacer en angostamientos.

No insistimos sobre la repartición de velocidades sobre la barrera, análoga a la de canales en escurrimiento uniforme de gran ancho respecto a la profundidad, pues el sentido común dice, que no variando el ancho del canal la repartición del gasto en el sentido transversal a la corriente no se altera, si bien en el fondo se nota a veces mayor velocidad que en la superficie.

En los filetes parietales hay, como en escurrimiento uniforme, disminución de velocidad, lo que perjudica a los pequeños salientes. Esa disminución la hemos avaluado, deducida de estas tres experiencias que presentamos y algunas otras, en término medio 5% respecto a la velocidad media; siendo la amplitud de variación de dicha disminución entre 2 y 10% de la velocidad media. El descenso de velocidad solo se hace sentir en los filetes muy cercanos a la pared, y la disminución de velocidad tiene entonces mucho menos importancia relativa que en escurrimiento uniforme.

Los errores de partición que conocemos son practicamente nulos, su valor numérico no tiene significación, pues es mayor el error de medida del caudal. Tales son errores de partición -0.04 , $+0.1$ $+1.2$ por ciento, en gastos del entrante 2 350 1 374 y 1 648 m³s, contados en salientes de razón de partición 0.20 0.47 y 0.30 con el entrante.

Se han ideado marcos de barrera con ensanchamiento, la razón de ser de dicha combinación está o bien en tratar de hacer lo más parecidas las velocidades medias sobre la barrera y aguas abajo, para disminuir la pérdida de carga por choque de una masa de gran velocidad en otra de poca o bien en dar al canal un gran ancho relativo a la hondura en la sección de partición para que las curvas isotáquicas sean rectas paralelas al fondo. En ámbos casos se disminuye la altura del remanso de aguas arriba.

En un tipo como éste subsistirá la disminución de velocidades en las orillas eso sí que tiende a disminuir su influencia relativa, pues el gasto por unidad de ancho disminuye. Se pierde o se aminora la regularización de velocidades, pues la aceleración de la corriente es escasa o puede llegar a anularse, tendiendo la repartición de velocidades a la ordinaria de escurrimiento uniforme.

Antes de terminar los marcos de barrera nos resta decir que con ellos se ha llegado a soluciones brillantísimas, (1) imposibles o costosas en otros tipos, siendo su base racional una hermosa aplicación de la teoría a la práctica con espléndido resultado, en una ciencia como la Hidráulica en que generalmente nos tenemos que contentar con groseras aproximaciones. Por último, no se debe confundir este

(1) Tal es por ejemplo un saliente desviado en ángulo recto y cuyo fondo está 1 m. más alto que el del canal pasante.

marco con el vertedero, pues si bien es cierto que la barrera es un vertedero en pared gruesa, y que justamente se le calcula para que sobre ella se cumpla la condición de gasto máximo, que corresponde a la crisis, el ideal del marco de barrera será aquel cuyo eje hidráulico haga una simple depresión sobre la barrera; así su aplicación puede extenderse a canales de cualquier pendiente sin desperdiciar cota, pues barreras de altura justa no producen aguas arriba un remanso de gran altura.