

Ing. Francisco Javier Domínguez.

Veinte años después

En los «Anales del Instituto de Ingenieros de Chile» publicamos en los meses de junio, julio y septiembre de 1922, un artículo titulado «Gradas de Bajada en Canales». Consistía ese artículo en un estudio experimental del fenómeno de escurrimiento al pie de la grada en sus diferentes fases: resalto alejado, resalto límite y resalto al pie, con escurrimiento crítico sobre ella en los dos primeros casos, o con río cuando el crítico era destruído por la influencia o submergencia de aguas abajo. Esas experiencias fueron resumidas en un cuadro final que cuatro años después fué reproducido en nuestro «Curso de Hidráulica» (polígrafo en 1925 e impreso en 1935) y en 1928 en el opúsculo «Marcos partidores».

Fueron motivadas nuestras experiencias por la imprescindible necesidad de juzgar sobre la ubicación del resalto y el comienzo de la influencia de aguas abajo en el régimen anterior a la grada, en estructuras tan frecuentes en la práctica profesional.

Los estudios del trazado del eje hidráulico, posteriores en los Estados Unidos a los chilenos, del profesor R. Salas (1), hicieron ver el vacío que rodeaba a los «puntos de partida», cuando éstos consistían en bajadas de fondo o gradas, o bien en barreras de vertedero. Bazin, en éstos, exclusivamente de pared delgada, dió la función empírica que indicaba el límite del resalto al pie, pero la aparición de la carga del vertedero en la fórmula impedía la generalización.

Aplicación continua han tenido en Chile las experiencias de gradas citadas, en partidores de agua, cálculos de cascadas, etc. Las experiencias nuestras, son, en total, 58 y fueron juzgadas y aprovechadas 80 de «Expériences nouvelles sur déversoirs», de Bazin, cubriendo todas las formas de escurrimiento sobre gradas citadas.

Nuestro «Curso de Hidráulica» y el opúsculo «Marcos partidores» nos fué solicitado por el Bureau of Standards de Wáshington, y allí están desde 1936, con los datos experimentales y referencias al artículo de Gradas de los «Anales del Instituto de Ingenieros».

Pues bien, en noviembre de 1941 aparece en el Proceedings de la American Society of Civil Engineers, un artículo del señor Walter L. Moore titulado «La Pérdida de Energía en la base del vertedero libre». Ahí se trata la primera parte de nuestro tema, gradas con resalto alejado y límite del resalto al pie en estudio experimental, en forma análoga a lo que 20 años antes habíamos tratado y resuelto en Chile, y utilizado abundantemente en aplicaciones profesionales durante todo este tiempo. Son ocupadas las mismas variables que habíamos empleado, sin dimen-

(1) La publicación de Hinds en Engineering New Records, es de 1920. Las de Bakhmeteff en inglés, comienzan en 1932. En Chile en 1912; la primera publicación en inglés y español, en 1915. La primera chilena en el Congreso Científico de Wáshington.

siones (1), para expresar el fenómeno. Abierta discusión en la citada revista han cooperado en ella, entre otros el profesor B. Bakhmeteff (abril de 1942).

El señor Moore ha creído necesario airear la napa inferiormente para hacerla «libre», es decir con presión atmosférica inferiormente. La napa libre que no puede presentarse en la práctica «libremente», sin ponerle dispositivos de aireación inferior, no tiene interés en lo que se refiere al eje hidráulico, por eso lógicamente no nos preocupamos de ella.

Al paso que el señor Moore obtiene en la napa «libre» torrentes al pie muy distintos de los nuestros y de los del profesor Bakhmeteff, éste hace ver, como nosotros habíamos encontrado, para todas las otras formas de napa, que ella no influye tampoco prácticamente en la pérdida de carga. Las experiencias de Moore hechas en el Laboratorio de Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de California, no coinciden con las nuestras: las gradas darían, según ese autor, menores pérdidas de carga de lo que nosotros habíamos encontrado. En cambio, Bakhmeteff (Proceedings de abril de 1942), en Columbia University, encuentra exactamente nuestras mismas alturas de torrente en gradas de altura relativa

$$\frac{a}{h_c}, \text{ inferiores a } 3.$$

Es de notar que esas gradas de altura relativa menor de 3 son precisamente las de napas *ahogadas*, es decir con el torbellino llenando completamente el espacio inferior (fig. 1) y por lo tanto *las únicas perfectamente estables* equivale a decir perfectamente definidas.

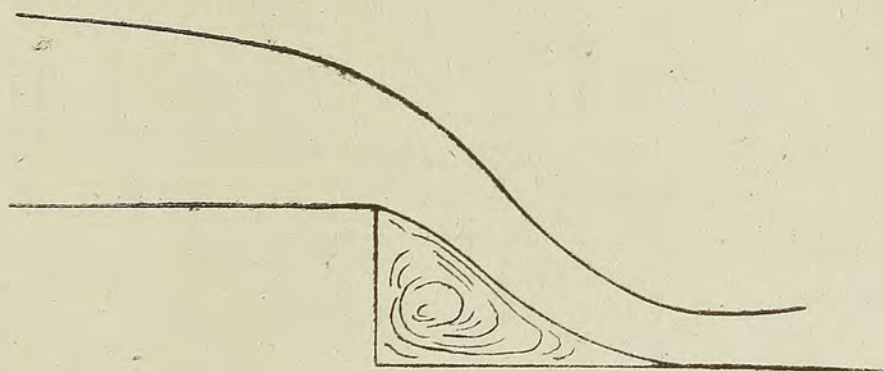


Fig. 1

Las de $\frac{a}{h_c} > 3$ corresponden a napas con aire debajo, o sea deprimidas o adherentes de Bazin. Existe en ellas el nivel del torbellino más o menos alto y no son bien estables. Como hace notar el profesor Bakhmeteff las medidas aparecen menos precisas y él cree que el Bernouilli final, determinado por medio de la medida de las velocidades y la altura de agua, resulta *menor* que el *real*, es decir es fácil exagerar el valor de la pérdida de carga. En nuestras experiencias tenemos en esa zona mayores pérdidas que Moore y menores que el profesor Bakhmeteff; él ha determinado la curva en esa parte con 7 experiencias $\left(\frac{a}{h_c} \right.$ comprendido

(1) A este respecto también hemos antecedido a los EE. UU. El uso de esa forma de cálculo, en apreciaciones de alturas relativas $\frac{h}{h_c}$, en Bernouilli gradas, compuertas y resaltos, son usadas en Chile desde 1916.

entre 3 y 7,1) y nosotros con 19; Moore en cambio, tiene entre $\frac{a}{h_c}$ comprendido entre 3 y 14,5, 7 experiencias y nosotros 24 (1).

En la práctica pocas veces se necesita juzgar de gradas mayores de 3 alturas críticas, en las estructuras delicadas, con paramentos verticales o tan poco inclinados que no modifiquen la forma de la napa, de manera que afecten también al torrente del pie y resalto consiguiente; por eso creemos que la perfecta concordancia de nuestra experimentación de hace 20 años con la reciente del profesor Bakhmeteff es una prueba suficiente de la exactitud de ambas, dándonos nueva confianza, que no fué nunca desmentida, el uso de nuestra tabla de valores experimentales.

La teoría del resalto en lecho rectangular de escasa pendiente tiene una comprobación experimental que podríamos llamar definitiva. Se resume en la igualdad de la «Momenta» del torrente anterior con la del río posterior. Valiéndonos de esta teoría encontramos en 1922 el resalto límite al pie de una grada, como ahora lo comprueban W. Moore y el profesor Bakhmeteff, partiendo del torrente que tiende a producirse al pie de la grada. Reproducimos en la figura 2 las curvas experimentales de 1922 y ponemos en segmentos las que corresponden a las experiencias del profesor Bakhmeteff. Ambas coinciden en $\frac{a}{h_c}$ menores de 3.

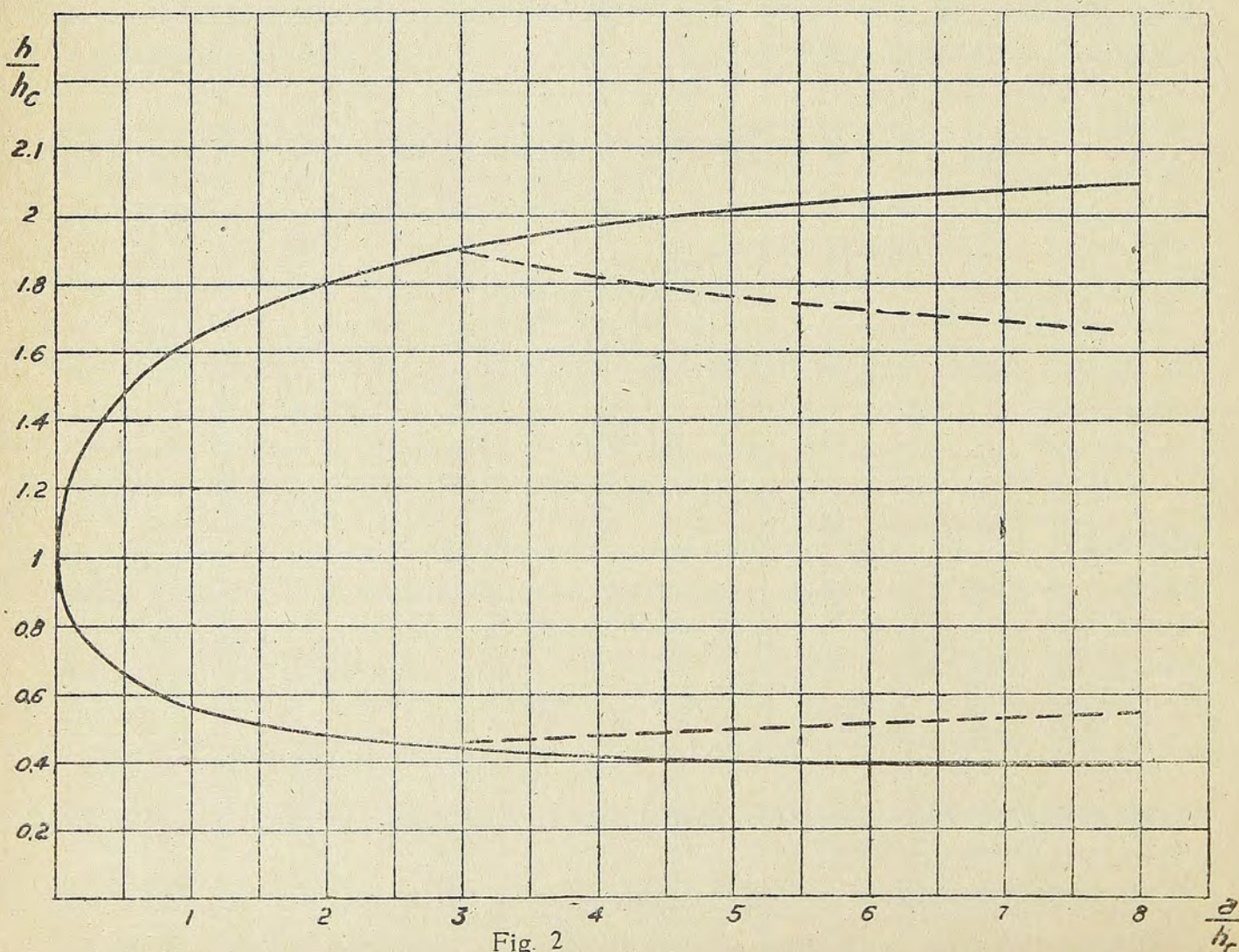


Fig. 2

(1) Moore trae un total de 11 experiencias, Bakhmeteff 24 y nosotros 58

Hay que hacer notar que el resultado práctico que indica una simple inspección ocular del gráfico en esa rama superior correspondiente al *río límite de resalto al pie* es que puesto que parece que ella tiende a ponerse paralela al eje de las alturas relativas de gradas, para traer el resalto al pie en un caso dado, bastará hacer que la altura relativa del río de aguas abajo pase del valor $\frac{h}{h_c} = 2.20$, sin preocuparse de cuál sea la altura relativa de grada. De ahí la facilidad de hacerlo con colchones de agua, por ejemplo. Con las experiencias del señor Bakhmeteff la mayor hondura relativa del río es solamente de 1.90.

Debemos también recordar que junto a nuestras experiencias colocamos todas las aprovechables de vertederos de Bazin y que la coincidencia es completa, como es fácil verlo en el gráfico N.º 2, de la página 374 de los «Anales del Instituto», de junio de 1922, que calzan también las presiones dadas por Bazin en una fórmula empírica, para la parte inferior de las napas ahogadas (gráfico N.º 3, pág. 375 de los citados «Anales») y que por último las conocidas fórmulas de Bazin del rechazo del resalto, reducidas a nuestras variables, dan una perfecta coincidencia con nuestras experiencias, como también lo demuestra el cuadro de la página 400 del número de julio de 1922 de los «Anales». La reducción a nuestras variables es fácil, refiriendo la carga a la altura crítica a través de las fórmulas siguientes:

$$q = m h \sqrt{2gh}$$

$$\frac{q^2}{g} = 2m^2 h^3 = h_c^3$$

$$h = h_c \sqrt[3]{\frac{1}{2m^2}}$$

Para m da Bazin valores experimentales y fórmulas que en el artículo citado aparecen tratadas y reducidas a nuestras variables.

En nuestro artículo de 1922 nos ocupamos de la distancia contada desde el paramento de la grada en que se produce el torrente de filetes paralelos y en el cual comenzará el resalto. En el cuadro resumen aparece, como en nuestro «Curso de Hidráulica», dicha distancia. Es útil y necesaria para el trazado del eje hidráulico. En el artículo, aun se hace notar la modificación de esa distancia en las napas adherentes. Los autores americanos no se preocuparon de ella.