

# Estado actual de la Hidráulica de los canales

**H**ACE unos veinte años el estudio del movimiento del agua en los canales se reducía al movimiento uniforme y a una deducción analítica hilada y lógica del movimiento variado, pero totalmente divorciada de la realidad objetiva. Es verdad que Boudin ya en 1863 (1) señaló la necesidad de abordar el movimiento variado en los casos reales y él dió un primer paso en ese sentido, pero predominó el criterio francés de Bélanger, Poncelet (1827), y Coriolis (1836), reforzado más tarde por Saint Venant (1851), Dupuit y Boussinesq (1877) de considerar únicamente lechos de ancho infinito y el coeficiente  $C$  de la fórmula  $V = C\sqrt{RJ}$ , como independiente de  $R$ ; así se lograba integrar la ecuación diferencial

$$dh = i \frac{h^3 - h_u^3}{h^3 - h_c^3} ds$$

Esta manera de proceder satisface al matemático que queda en posesión de la ecuación de la curva del eje hidráulico, no importándole gran cosa la inutilidad práctica de tal razonamiento, pero no llena las necesidades del ingeniero, que

no puede aceptar en las cuestiones que debe resolver ecuaciones que han partido de hipótesis enteramente diversas de la realidad. La necesidad de abordar, sin embargo, algunos casos ineludibles del movimiento variado había llevado a considerar el remanso de subida y bajada de la pendiente suave (río peraltado y deprimido), abandonando los otros cuatro casos del eje hidráulico, como casos poco reales y cuya previsión por ese método era incierta. Estaban sin embargo a la vista las experiencias de Bazin (1)

(1) Los seis casos de eje hidráulico del movimiento variado son 3 en pendiente suave y 3 en fuerte. Los de pendiente suave son: 1.º, río peraltado, 2.º, río deprimido y 3.º torrente deprimido; los de pendiente fuerte: 4.º, río peraltado, 5.º, torrente peraltado y 6.º torrente deprimido. En las experiencias de Bazin, aparece el caso N.º 1 en las series 78, 79, 80; el N.º 2 en las 12, 24, 25, 26 y 27 de movimiento uniforme y 80, 81, 82 y 83 de escurrimiento variado; el 3.º caso aparece en la serie 81, aguas abajo de la grada, en la 7 (experiencia 12, que es cambio de pendiente fuerte a suave), inmediatamente aguas abajo del cambio de pendiente; el 4.º caso en las series 89, 90 y 91; el 5.º caso en las series N.º 8, (aguas abajo del perfil 291), en todas las experiencias de la serie; en las series 11, 14 y 17, aguas abajo del perfil 485, y el caso N.º 6 en las 4 experiencias de las series 32 y 33, pues en todas ellas hay un cambio de pendiente fuerte a otra menos fuerte; el 6.º caso se desarrolla aguas abajo del perfil 16.

(1) L'Axe Hydraulique des cours d'eau, (Gante y París).

en que aparecen los seis casos del eje hidráulico, pero aun no se ha podido integrar la ecuación diferencial para los lechos de las formas usuales, trapeciales, parabólicas, etc.

Hoy se procede de otra manera; se prescinde de la ecuación misma de la curva de remanso, pero hemos podido, por medio de algunas consideraciones y puntos de partida, darnos cuenta cabal de la forma que toma en cada caso práctico el eje hidráulico y se le traza por puntos escalonados, método poco más largo que el de las tablas de Bresse, Dupuit, Rühlmann, Tolkmitt o Schaffernack, pero que da el eje hidráulico con mucho más exactitud que ellas, que se basan en simplificaciones, muchas veces inaceptables.

Las consideraciones que permiten hoy día abordar fácilmente el movimiento variado son tres. La primera es el hecho de que la profundidad crítica corresponde a la menor suma de Bernoulli que el líquido puede tener en la sección referido a su fondo. La segunda es que la pérdida de carga de frotamientos en movimiento variado es igual a la que corresponde al movimiento uniforme con igual velocidad, aspereza y radio hidráulico. Nos referiremos con algún detalle a ambas. Hay además una tercera que es la prescindencia del coeficiente  $\alpha$  que multiplica a la altura de velocidad media o a su variación. Esta última, prácticamente aceptada por todos los hidraulicistas, aun antiguos, es solamente contradicha hoy día por Mouret y Eydoux (1) que toman para  $\alpha$  el valor empírico dado por Bazin para el movimiento uniforme, valor que solamente hace variar  $\alpha$  con el coeficiente  $b$  o  $C$  de Chezy, en vez de considerar su variación con la velocidad, que

es en movimiento variado la principal. Nos extenderíamos demasiado y nos saldríamos de la cuestión al ocuparnos aquí de este coeficiente, discutido por don Ramón Salas E. en «Movimiento variado del agua en los canales» (1), pues queremos referirnos especialmente a las dos primeras consideraciones.

El escurrimiento crítico o mínimo de Bernoulli o de energía por unidad de peso en una corriente que escurre con filetes medio locales, paralelos, es la clave de la discusión del eje hidráulico del movimiento variado, si se prescinde de fórmulas, y es sin duda la consideración que mayor luz arroja sobre la discusión. Así se nota con qué obscuridad, confusión e imprecisión y cuantos errores se escapan a los autores que tratan esta materia desconociéndolo. Es tan frecuente el escurrimiento crítico en la Naturaleza, que los que nos ocupamos de la Hidráulica de los canales, podemos decir que se nos coloca frente de los ojos a cada paso en forma tan clara e inconfundible que constituye el apoyo más sólido, en muchos casos, y al medirlo, la exactitud que se alcanza supera muy lejos a la que dan ordinariamente las medidas de la Hidráulica. Hábiles experimentadores, mucho antes de su descubrimiento, demostraron sus propiedades sin sospecharlo; sin acudir a otro que a Bazin, lo encontramos demostrando el aislamiento de las variaciones de aguas abajo en el vertedero de pared gruesa, donde hay escurrimiento crítico (2).

La profundidad crítica o la velocidad crítica, es decir, los elementos del escur-

(1) Pág. 40 y siguientes.

(2) Bazin.—Experiences nouvelles sur l'écoulement en deversoir. En 5e. article, pág. 65 dice que el nivel de aguas abajo puede llegar al 85% de la carga de un vertedero de pared gruesa (1,4 de la profundidad crítica) sin que se altere el gasto.

(1) Mouret.—Cours d'Hydraulique Générale, pág. 440, (1922). Eydoux.—Hydraulique Générale et Appliquée, pág. 217. París, 1921.

rimiento crítico aparecen naturalmente en la discusión clásica de la tangente a la curva de remanso. La denominación «crítica» me parece que se encuentra por primera vez en Rabut (1905), su nombre proviene evidentemente, de que ella es la profundidad que tiene una influencia decisiva en la forma del eje hidráulico. De la comparación de ella con la *profundidad normal* o profundidad de movimiento uniforme resulta la clasificación de los lechos en *pendientes fuertes y suaves*; de la comparación de ella con la profundidad actual resulta la clasificación de las corrientes en *ríos y torrentes*. La curva de variación del Bernoulli de un canal con la altura de agua da idea clara de la disminución de altura que corresponde a los ríos cuando su Bernoulli disminuye y a la inversa del aumento de altura que en esa circunstancia corresponde a los torrentes, y así se explica el aumento de altura de los torrentes deprimidos (1) y de los ríos peraltados y la disminución de altura de los ríos deprimidos y torrentes peraltados.

La velocidad crítica es igual a la velocidad con que se propagan las ondas de traslación: como los torrentes son más veloces que las ondas, no podrán ser remontados por ondas, pero lo serán los ríos, menos veloces que ellas. Las

(1) Los seis casos del eje hidráulico respecto a las profundidades llamando  $h$  la profundidad actual,  $h_u$  la normal y  $h_c$  la crítica son:

*pendiente suave*  $h_u > h_c$

- 
- 1.º  $h > h_u > h_c$  — río peraltado
  - 2.º  $h < h_u > h_c$  — río deprimido
  - 3.º  $h < h_c < h_u$  — torrente deprimido.

*pendiente fuerte*  $h_u < h_c$

- 
- 4.º  $h > h_c > h_u$  — río peraltado
  - 5.º  $h < h_c > h_u$  — torrente peraltado
  - 6.º  $h < h_u < h_c$  — torrente deprimido.

ondas de altura elemental constituyen la forma como se propagan las variaciones de aguas abajo hacia aguas arriba; y por lo tanto podemos concluir que los torrentes no son influenciados por aguas abajo y dependen solamente de aguas arriba los ríos, en cambio, por efectos de aguas abajo se influncian en toda su extensión hacia aguas arriba, o sea, dependen de aguas abajo. Una caída que dé término a una pendiente fuerte no acelera ni varía en nada al torrente uniforme que la anteceda; la existencia de una causa de retardo, como una barrera de vertedero, que siga a una pendiente fuerte y que exija un río para tener la carga necesaria al escurrimiento, podrá bruscamente destruir el torrente, transformándolo en el río por medio del resalto, pero no se alterará el torrente uniforme antes del resalto, porque *en ningún caso el torrente es destruido paulatinamente por condiciones de aguas abajo*.

Pero nos queremos referir especialmente a otra consecuencia que fluye de la existencia de un Bernoulli mínimo. En un canal puede haber variaciones de ancho o de cota de fondo entre dos secciones poco distantes, y en la más ancha o en la más baja existir, contado desde su fondo un Bernoulli dado, fijado por condiciones de aguas abajo. Este Bernoulli sobre su fondo puede tener un valor menor que el crítico que corresponde a la sección más alta o más angosta: en este caso existe en esta última sección el mínimo de Bernoulli (1). Este raciocinio está enteramente demostrado por la experiencia, por eso sobre las barreras y en los angostamientos es fácil encontrar el escurrimiento crítico.

Intimamente ligada al escurrimiento crítico está la teoría de los resaltos, que

---

(1) Lo mismo dice Casler en Transaction of Am. S. C. E. Tomo 94. 1930. pág. 12.

se presentan, como hemos dicho, cuando un río de aguas abajo exige la destrucción de un torrente. La teoría que consiste en aplicar el teorema de las cantidades de movimiento es debida a Bélanger y ha sido ampliamente confirmada por la experimentación que luego citaremos. De la teoría de Bélanger se desprende que el resalto se verifica de un lado a otro del Bernoulli mínimo, es decir, que un torrente no puede saltar a otro torrente ni un río a otro río, que es necesario sea de un torrente a un río o vice-versa. Un análisis de la pérdida de carga exige que el resalto sea de un torrente de aguas arriba a un río aguas abajo, y que los llamados resaltos de bajada no puedan físicamente existir. Estos últimos jamás han podido ser observados, como es lógico, y hoy día los hidraulicistas que analizan el asunto los desechan como absurdos. En todos los lechos de la práctica en que la sección, el ancho superficial y el radio hidráulico son siempre crecientes con la profundidad (1), a cada altura de torrente corresponde, en un resalto, una sola altura de río. Además, los ejes hidráulicos de torrente deprimido y río peraltado en pendiente fuerte no pueden jamás desarrollarse hasta la profundidad crítica, que siendo de mínima energía, requeriría un aumento de energía para abandonarla, hecho físicamente inaceptable; por lo tanto, el torrente deprimido en pendiente fuerte se convierte en río antes de llegar a la crisis, el río peraltado no comienza en la crisis sino en un resalto que corresponde al torrente que le precede.

En cambio, el río deprimido, que depende de aguas abajo, producido por una aceleración puede llegar hasta la

destrucción total del río, es decir, hasta la crisis, y el torrente peraltado puede igualmente arrancar de la crisis. Ambos casos, como veremos, han sido ampliamente demostrados por la experiencia. Se pueden juntar, y de hecho así han sido también experimentados, en el cambio de pendiente suave a fuerte.

He aquí condensadas en pocas palabras las deducciones que se siguen de considerar el escurrimiento crítico en el estudio del movimiento variado.

La noción de *escurrimiento crítico* o mínimo Bernoulli, como sucede con muchas investigaciones científicas, ha brotado simultáneamente en distintas partes. Como dice J. G. Woodburn, (1) precisamente refiriéndose a esta cuestión: «ha sido desarrollada por varios investigadores que trabajaron independientemente en diferentes países». En Rusia, Bahkmeteff (2) publicó su *Escurrecimiento Variado de líquido en canales*, en 1912, dando a conocer el mínimo de Bernoulli y la curva de Bernoulli citada. En Chile, el profesor Salas Edwards desde 1912 pasaba en su clase de Hidráulica de la Universidad Católica su teoría del escurrimiento crítico, a la que me tocó asistir en 1913; publicó en Washington, en 1915, en el Congreso Científico Pan Americano «Un estudio sintético del trazado del eje hidráulico» (3); poco después (1918) publicó su *Escurrecimiento Variado* que fué reimpresso en 1922. Además del escurrimiento crítico, el señor Salas Edwards estudió la teoría de los resaltos, demostrando el absurdo del resalto de bajada, y las alturas de río correspondientes a las de torrente. Es-

(1) Transaction of American Society of C. E. Tomo 96, año 1932, pág. 447.

(2) Boris A. Bahkmeteff, profesor de la Columbia University.

(3) Transaction of the Second Scientific Pan American Congress, págs. 784 a 790.

(1) En la sección rectangular el ancho superficial es constante, pero entra en la consideración que se hace.

tas mismas cuestiones relativas a los resaltos habían sido demostradas ya por Boudin (1) en 1863. El escurrimiento crítico ha sido en Chile experimentado desde 1916 (2), igualmente los resaltos en el terreno y en el laboratorio, comprobando muy bien la teoría. En Estados Unidos se han ocupado de estas marías, Kennison (1916) (3), principalmente sobre resaltos y las dos clases de corrientes, ríos y torrentes. Comprobó la validez experimental indiscutible de la teoría de Bélanger sobre resaltos valiéndose de las experiencias de Bazin, Ferriday y Gibson (1914). Sobre escurrimiento crítico han escrito Hynds (1920) (4), Woodwards, Riegel y Casler (5), y han experimentado especialmente Woodburn (6), que ha medido 305 alturas críticas, 13 resaltos y experimentado 18 veces el torrente peraltado en pendiente fuerte, en perfecta concordancia con el trazado por puntos escalonados, como lo hemos personalmente comprobado.

Es interesante notar que en las 39 experiencias en que las barreras eran formadas por contrapendientes suaves, equivalentes a un paso de pendiente suave a fuerte se produce la profundidad crítica

a plomo del cambio de pendiente como exige la teoría.

En los textos americanos aparece el escurrimiento crítico desde Russell (Tecnicológico de Massachusset, edición de 1921) en King (1) (Universidad de Michigan, 1929).

En Suecia experimentó los resaltos Lindquist (2) y sus experiencias coinciden perfectamente con la teoría de Bélanger.

En Alemania principalmente Boss y Rehbock; el primero ha estudiado el escurrimiento crítico teórica y experimentalmente, midiendo profundidades críticas y estudiando el calce de experiencias de resaltos con la curva deducida de la teoría, con gran coincidencia (3). Rehbock ha comprobado la existencia del escurrimiento crítico entre los machones de un puente (4), ambos han experimentado en el laboratorio de Karlsruhe. También se han ocupado de estas materias Carstanjen y Koch (1926), en «Von der Bewegung des Wassers.» En textos de Hidráulica alemanes trata el escurrimiento crítico Weyrauch, en su edición de 1921.

En Francia se ocupa del escurrimiento crítico Mouret, en la obra citada, pág. 426 a 432. Experimentalmente, como se dijo, Bazin, que ha demostrado sin sospecharlo, su existencia en los ríos deprimidos de sus series Núms. 80 a 83 (5) y en los vertederos de las series 114, 115,

(1) L'Axe hydraulique, 1863. Las alturas de resalto, pág. 18 y fig. 5; el absurdo de los resaltos de bajada, pág. 20.

(2) Me ha tocado la suerte de hacerlo y se han publicado los siguientes folletos y artículos: Estudio experimental del escurrimiento crítico, 1917.—Gradas de bajada.—ANALES INST. DE ING., 1922.—Marcos partidores, 1928.

(3) Transaction Am. Soc. C. E. Vol. 80. The Hydraul. Jump. in open channels.

(4) Engineering New Record, 25 Nov. 1920, también trata sobre resaltos.

(5) Stream flow in general terms. Trans. Am. S. C. E., Tomo 94, 1930, págs. 1-61, con discusión de Bailey y Pearce.

(6) Test of broad-crested weirs.—Proceeding 1930.—Transac. Am. Soc. C. E., Tomo 96, 1932, págs. 487-453.

(1) Handbook of Hydraulic, págs. 329-352.

(2) «Manera efectiva de producir la disipación de energía al pie de un vertedero». Stockholm, 1927.

(3) Berechnung der Wasserspiegellage.—V. D. I., 9 de Abril de 1927.

(4) Zur Frage des Brückenstaues. Zentralblatt der Bauverwaltung, N.º 37, 1919.

Véase un artículo sobre remanso de los machones de un puente, en Anales del Instituto de Ingenieros de Chile. Marzo de 1933.

(5) Recherches Hydrauliques.

116, 117 119 y 124 de l'Écoulement en Deversoir, 5e. article.

En Italia, Spataro reproduce la teoría del escurrimiento crítico sacada de los americanos.

Puede decirse que todos los autores modernos se preocupan ya del escurrimiento crítico y que la teoría del movimiento variado, antes eliminada sistemáticamente de los textos para ingenieros entra hoy día, sobre la base del escurrimiento crítico.

La segunda consideración que ha facilitado el estudio del movimiento variado es que la pérdida de carga debida a los frotamientos corresponde a la ecuación

$$J = \frac{V^2}{C^2 R}$$

con los mismos valores que tiene  $C$  para el movimiento uniforme. No se trata propiamente de una extensión de esta fórmula de movimiento uniforme al variado, sino más bien sucede lo contrario. Una simple ojeada de las experiencias de Bazin, en las planchas de Recherches Hydrauliques revela que todos los casos de movimiento uniforme estudiadas corresponden mejor al movimiento variado; las pendientes suaves porque son ríos deprimidos y las fuertes, torrentes peraltados. Así tenía que ser lógicamente. Si se considera que un torrente uniforme, partiendo de cualquier forma inicial *se obtiene teóricamente a infinita distancia del comienzo*, y que cualquier terminación altera *el río uniforme hasta infinita distancia hacia aguas arriba* se comprenderá que la consideración de que sean uniformes es aproximada; en muchos casos suficientemente aproximada. Además, el movimiento uniforme requiere constancia absoluta de forma de lecho, pendiente y rugosidad en extensión indefinida, ¿quién

podrá pretender tenerla en un canal artificial, aun de concreto? En caso de paredes de tierra la cosa es evidente, por eso pues podemos decir que los valores de  $C$  han sido experimentados en movimiento variado y extendidos al uniforme, cuya existencia rigurosa es difícil de comprobar (1).

Sobre el coeficiente  $C$  en estos últimos veinte años se ha avanzado poco, además de las fórmulas anteriores de Kutter (1869), Manning (1890) y nueva de Bazin (1897), de uso general en todas partes, apenas podría agregarse la de Forchheimer (1924) y la de Koechlin (1926), que en nada alteran el estado de la cuestión desde entonces.

En resumen, podemos pues decir que la Hidráulica de los canales entra en rápido avance apoyada en el escurrimiento crítico, que todos los autores modernos consideran en su justo valor. Su existencia y sus consecuencias están hoy día demostradas por la experimentación, que principalmente en Estados Unidos y Alemania se ha hecho y se sigue haciendo. Nuestro país tiene la honra de haber participado en forma destacada en este avance científico, en el terreno analítico. En el experimental tampoco se ha quedado atrás. Es la esperanza del que escribe estas líneas, encontrar luego realizados sus anhelos de ver formarse a nuestros jóvenes ingenieros de la Universidad de Chile, experimentando y comprobando la teoría de la energía mínima, como ya lo hacen los de la Universidad Católica, con la satisfacción y el descanso que produce en la mente el encontrarse ante las cosas definitivas.

(1) Recordemos que Kutter consideró en su fórmula las experiencias de Humphreys y Abbott hechas en el Mississippi en trozos en que había islas. ¿Quién podrá creer que había ahí movimiento uniforme?