

Estudios en honor de
Francisco Javier Domínguez
AUCH, 5ª Serie, N° 8 (1985): 199-210

CARACTERISTICAS DEL ESCURRIMIENTO TORRENCIAL EN CANALES

JOSÉ SALVADOR GANDOLFO
Universidad de Buenos Aires

I. INTRODUCCIÓN

El escurrimiento del agua en canales cuando la altura líquida es menor que el correspondiente valor crítico corresponde al movimiento torrencial o supercrítico.

En ese caso, si la corriente es permanente, las sucesivas secciones transversales son iguales cuando el gasto líquido y la correspondiente velocidad media son invariables y se mantienen constantes la aspereza de las paredes y la pendiente. Sin embargo, el movimiento no es uniforme por cuanto los filetes líquidos no son paralelos y, en consecuencia, no puede aplicarse con rigor la ecuación de Bernoulli en el cálculo de la pérdida de energía y en la determinación de las curvas de remanso en los casos de movimiento permanente variado.

El no paralelismo de los filetes líquidos pudo observarlos el autor en el año 1943, en el funcionamiento de la primera aplicación de canales de dichas características en la red de riego del Alto Tunuyán (Provincia de Mendoza, República Argentina). Los resultados favorables obtenidos y la economía de inversión determinaron que los canales de escurrimiento torrencial se extendieran a otros planes de obra argentinos¹.

2. NOTACIÓN

B_c ancho de la superficie libre del agua en el canal cuando la masa líquida escurre en régimen crítico.

B_o	ancho de la superficie libre del agua.
$f_{m\acute{a}x}$	altura del agua en la posición de tangencia de la base circular con el talud de las secciones de forma tolva.
g	aceleración de la gravedad.
Δh	altura de agua desde la superficie libre a la posición de tangencia de la base circular con el talud en las secciones de forma tolva.
h	altura de agua desde el eje de la solera a la superficie libre.
h_c	altura de agua desde el eje de la solera a la superficie libre en el régimen crítico.
m	proyección horizontal del talud en la unidad de altura.
n	factor de aspereza.
Q	gasto líquido que escurre por el canal.
r	radio de la sección segmento de círculo o de la solera en la sección tolva.
R	radio medio hidráulico.
R_o	ancho de la superficie libre en la posición de tangencia de la base circular con el talud en las secciones de forma tolva.
U	velocidad media del agua.
φ_c	ángulo al centro que establece el ancho superficial.
φ_m	ángulo de la normal al talud respecto a la horizontal o del talud respecto a la vertical.
$\varphi\alpha$	ángulo al centro de las normales a ambos taludes.
Ω	área de la sección mojada del canal.
Ω_c	área de la sección mojada del canal cuando el gasto líquido escurre en régimen crítico.
χ	perímetro mojado de la sección del canal.
ϕ	función de $(\varphi_c, \varphi\alpha)$.
ψ	función de $(\varphi_c, \varphi\alpha)$.

3. FUNCIONAMIENTO

Los filetes líquidos superficiales se dirigen desde cada costado o talud hacia el centro del canal, con trayectorias hacia abajo, aparentemente paralelas y rectas, con ángulo respecto al eje longitudinal que debe variar bajo distintas condiciones hidráulicas y geométricas del canal. En la posición de la superficie libre donde se encuentran ambas trayectorias convergentes, la vena rompe según una cresta de aguas agitadas, bien destacada respecto de la disposición suavemente ondulada de las franjas laterales (Fig. 1). Observado desde arriba ofrece el aspecto de las espinas de los

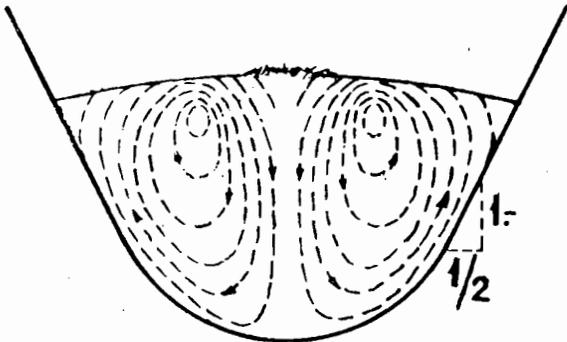
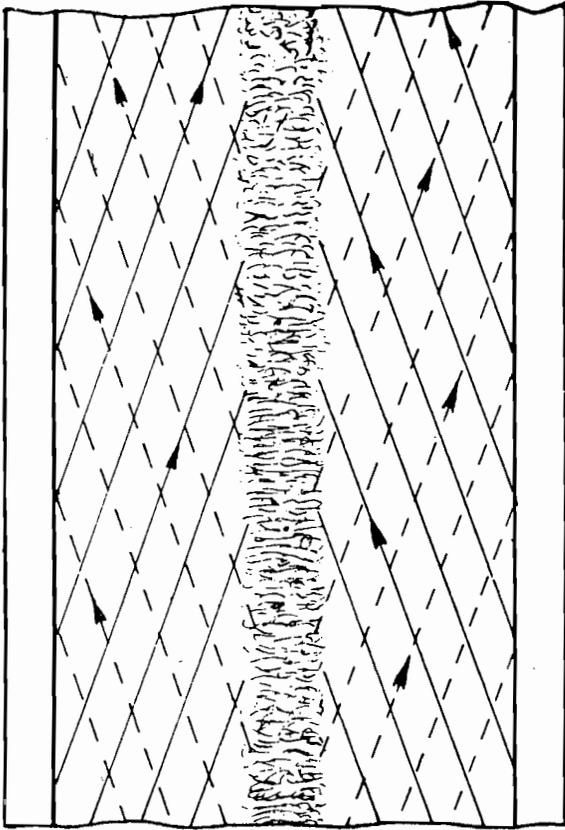


Figura 1

peces, que prolijamente se unen a la superficie más rugosa de la columna dorsal. En las curvas, de curvatura suficientemente pequeña, dicha cresta abandona el eje geométrico, desplazándose levemente hacia la concavidad.

Debido a la turbiedad de las aguas, las características del movimiento dentro de la masa líquida debió ser interpretada por el autor, a saber: el efecto hidráulico determinado por la resistencia de las paredes origina junto a ellas un escurrimiento líquido más lento que el correspondiente a los filetes líquidos que se mueven en el mismo instante en el interior de la sección del canal, donde debido a los razonamientos más débiles que allí se operan, ocurren velocidades mayores de dichos filetes líquidos, que crecen hacia la zona cercana a la superficie libre. Allí, cuando la longitud del alineamiento recto es suficiente, el desplazamiento longitudinal útil de los filetes líquidos centrales es máximo y escurren con la pendiente del canal.

En la sección normal del canal, la zona vecina a la cresta, de mayor altura y energía cinética, alimenta inferiormente a las zonas de menores presión y velocidad relativas, retardándose la masa líquida. Por la continuidad de la distribución de los gastos elementales, la parte veloz debe recibir un gasto igual, que es provisto por la parte lateral y superior de la masa líquida mediante filetes líquidos que disponen de una gradiente inclinada desde afuera hacia la posición de la cresta, con lo que se origina el movimiento tridimensional.

En efecto, el escurrimiento del agua ocurre aparentemente dispuesto en filetes líquidos animados de movimiento helicoidal sobre cada lado de la cresta superficial, fuertemente perturbado por las características de alta turbulencia del movimiento*.

La corriente de agua en las curvas de fuerte curvatura no presenta el movimiento helicoidal único, como ocurre en el régimen de corrientes subcríticas. Cuando se supera el ángulo de onda se origina el movimiento ondulado, con ondas positivas y negativas (Knapp e Ippen).

Además del movimiento doble helicoidal principal, pueden anotarse algunos secundarios entre los que cuentan:

- a) el movimiento ondulatorio de toda la masa líquida aguas abajo de los desarrollados en fuerte curvatura o debido al pequeño cambio brusco de dirección o a la presencia de aristas vivas;

* Se insiste en explicar ese tipo de funcionamiento, por cuanto es habitual considerarlo según filetes longitudinales.

- b) las influencias locales originadas en las juntas del revestimiento del canal, que se manifiestan por suaves ondulaciones;
- c) el choque de los filetes superficiales contra las salientes o entrantes de las juntas transversales del revestimiento del canal, proyectándose las partículas líquidas por el aire. Si no se tomaran precauciones pueden sobrepasar el franco del canal, bañando el terreno inmediato;
- d) las crestas de las ondulaciones pueden romper contra el talud del canal, desprendiéndose partículas que a medida que ascienden pierden energía cinética y se desplazan con menor velocidad relativa, cubriendo el paramento con sucesivos abanicos líquidos que vuelcan sobre la superficie libre con apariencia óptica hacia atrás.

La turbiedad de las aguas impidió que el movimiento de que se trata pudiera apreciarse en el interior de la corriente, lo que de todas maneras hubiera sido muy imperfecto por la alta velocidad del desplazamiento. La interpretación que se da obedece a los indicios superficiales, sobre los cuales el autor debió imaginar el proceso integral del movimiento. Un estudio minucioso exigiría disponer de un tramo recto de canal, con instalaciones apropiadas a las observaciones que deberían desarrollarse en el periodo de aguas claras. La ejecución de tramos experimentales en los laboratorios de hidráulica haría necesario un largo canal donde pudiera desarrollarse el régimen de movimiento correcto, por cuyo motivo deberían disponerse en amplios campos de experiencia.

4. LÍMITE DEL PRESENTE MOVIMIENTO

El régimen supercrítico tiene el límite inferior hidráulicamente definido por la altura crítica, que corresponde al Número de Froude 1, encima de la cual la corriente escurre en régimen subcrítico, aunque es dudoso, por las características del movimiento ya descrito, que tenga una delimitación tan precisa.

También hay un límite máximo en que el movimiento puede ser considerado torrencial. En los canales de base estrecha, siendo la pendiente disponible igual o mayor que cuatro veces la pendiente que establece el escurrimiento crítico, se modifican las características del movimiento; en los canales de base ancha puede ser bastante menor el número de veces de la pendiente crítica para que se establezca la nueva forma de movimiento.

Cuando las pendientes exceden los límites señalados y el canal es de suficiente longitud, una perturbación cualquiera de la corriente puede ser el origen de un movimiento especial caracterizado por sucesivas ondas

rodantes y/o deslizantes, cuyas profundidades en la cresta superan a la de la altura de agua que le correspondería en el movimiento torrencial.

El comportamiento hidráulico del escurrimiento caracterizado por sucesivas ondas rodantes y/o deslizantes escapan de la interpretación y del conocimiento que se posee acerca del escurrimiento permanente de las corrientes superficiales.

5. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL CANAL Y CONSIDERACIONES

Entre las diversas formas de sección transversal del canal se aconsejan las de forma tolva con taludes apropiados a la calidad del terreno y con la altura de agua máxima normal en la posición del centro del arco de círculo de la solera, en cuyo caso el canal requiere el mínimo de revestimiento.

Cuando el gasto líquido que debe conducirse exige de la sección tolva alturas de agua inconvenientes, se puede emplear la forma de segmento de círculo que también es un canal de revestimiento mínimo; en este caso desde el nivel de agua máximo normal se puede quebrar el arco de círculo con un talud plano de inclinación adecuada a la naturaleza del terreno, por toda la altura del franco.

Las secciones de solera curva facilitan el recorrido perimetral de los filetes líquidos en el movimiento doble helicoidal. Además, durante las bajas dotaciones de agua las alturas son más elevadas y es menor la influencia que las imperfecciones de las juntas del revestimiento ocasionan en la agitación del desplazamiento de los gastos líquidos.

Debe agregarse, también, que en las soleras planas, junto a los vértices del fondo, ocurren movimientos circulatorios que en el caso de las corrientes supercríticas se acentúan, estableciendo una turbulencia adicional que perturba el desplazamiento doble helicoidal.

Por las altas velocidades con que se desplazan las aguas es indispensable el revestimiento de dichos canales con superficies muy lisas para no agravar la formación de acciones secundarias que acompañan al movimiento doble helicoidal expresadas en el párrafo 3.

En el proyecto de canales torrenciales se aprovecha la pendiente del terreno según tramos. La transición entre tramos debe hacerse redondeando las aristas de la intersección, y la convergencia o divergencia de las secciones transversales debe efectuarse con gran suavidad con el fin de evitar zonas de separación. Estas o la caída de volúmenes sólidos, por ejemplo, desplazamiento de tierras o ingreso de masas rodantes, así como la caída de animales voluminosos pueden establecer la formación mo-

mentánea del resalto hidráulico y durante el tiempo hasta que pueda desplazarlos, la altura conjugada desborda el coronamiento del canal, ocasionando probables daños que pueden llegar a la rotura de la obra.

El cálculo de los canales funcionando en régimen supercrítico debe efectuarse por los medios habituales empleados en las corrientes subcríticas, pero si se considera que los filetes líquidos no se desplazan longitudinalmente y por lo demás efectos señalados, es aconsejable tomar el factor de aspereza algo más elevado.

Los valores y relaciones geométricos adimensionales de la sección de forma tolva correspondientes a los taludes más usuales se dan en las tablas que siguen.

Sección Tolva

La superficie libre del agua en el centro de la curva circular de la solera.

m	φ_m	φ_x	$\sqrt{1 + m^2}$
1/2	26°33'54"	126°52'12"	1,11803
2/3	33°41'22"	112°37'16"	1,20185
3/4	36°52'12"	106°15'36"	1,25000
1	45°	90°	1,41421

m	Ω/r^2	x/r	R/r	Bo/r	$\Delta h/r$	h/r
1/2	1,60714	3,21430	0,5	2,23605	0,44721	1,0
2/3	1,64951	3,29894	0,5	2,40371	0,55471	1,0
3/4	1,67722	3,35459	0,5	2,50000	0,60000	1,0
1	1,78541	3,57080	0,5	2,82842	0,70711	1,0

La superficie libre del agua en los puntos de tangencia del talud con la curva circular de la solera:

M	φ_m	φ_α	Ω/r^2	χ/r	R/r	Ro/r	$f_{\text{máx}}/r$
1/2	26°33'54"	126°52'12"	0,70715	2,21430	0,31936	1,78884	0,55279
2/3	33°41'22"	112°37'16"	0,52127	1,96561	0,26520	1,66412	0,44529
3/4	36°52'12"	106°15'36"	0,44722	1,85459	0,24114	1,60000	0,40000
1	45°	90°	0,28540	1,57080	0,18169	1,41421	0,29289

Las grandes velocidades con que se desplaza la masa líquida en los canales que funcionan en régimen supercrítico exige que las aguas transporten materiales sólidos de pequeñas dimensiones, como son los limos y arcillas y el contenido de coloides. Los materiales sólidos mayores que los limos deben ser enteramente eliminados de la masa líquida por la ablación que ocasionan al revestimiento del canal.

6. CONDICIONES PARA EVITAR LA MODIFICACIÓN DEL RÉGIMEN DE ESCURRIMIENTO

La ruptura de la corriente líquida que se espera en el pasaje del régimen torrencial al subcrítico, con fuerte elevación de la altura de agua, señala la necesidad de que no se modifique el régimen con la variación de los gastos líquidos durante el funcionamiento del canal.

Se estudia por medio de la altura crítica que limita inferiormente al régimen torrencial y el análisis de la energía propia de la corriente:

$$h + \frac{U^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{2g\Omega^2}$$

En las secciones tolva y segmento de círculo la altura crítica se obtiene de la representación gráfica de las ecuaciones:

$$\frac{1}{r} \left[\frac{16}{g} \left(\frac{Q}{r} \right)^2 \right]^{1/3} = \phi(\varphi_c; \varphi_\alpha); \quad \frac{h_c}{r} = \psi(\varphi_c; \varphi_\alpha)$$

La Figura 2 permite calcular la altura crítica de la Sección tolva que corresponde al gasto líquido Q , taludes m y radio r de la solera; además, la altura crítica de la sección segmento de círculo correspondiente al gasto líquido Q y radio r de la solera².

En general, los gastos líquidos que escurren por el canal no modifican el régimen de desplazamiento por cuanto las relaciones de las respectivas profundidades de agua y alturas críticas varían lentamente, exceptuando las alturas de agua muy pequeñas, cuando los gastos mayores se desplazan en régimen supercrítico, cuyas alturas conjugadas quedan contenidas dentro de la sección del canal.

La excepción a esa regla general, en cuyo caso puede haber régimen torrencial para las mayores alturas de agua y subcrítico para las menores, depende de una breve amplitud de los valores de:

$$\frac{g n^2}{i r^{1/3}}$$

para las secciones tolvas y segmento de círculo.

El autor recomienda que los siguientes valores deben ser evitados:

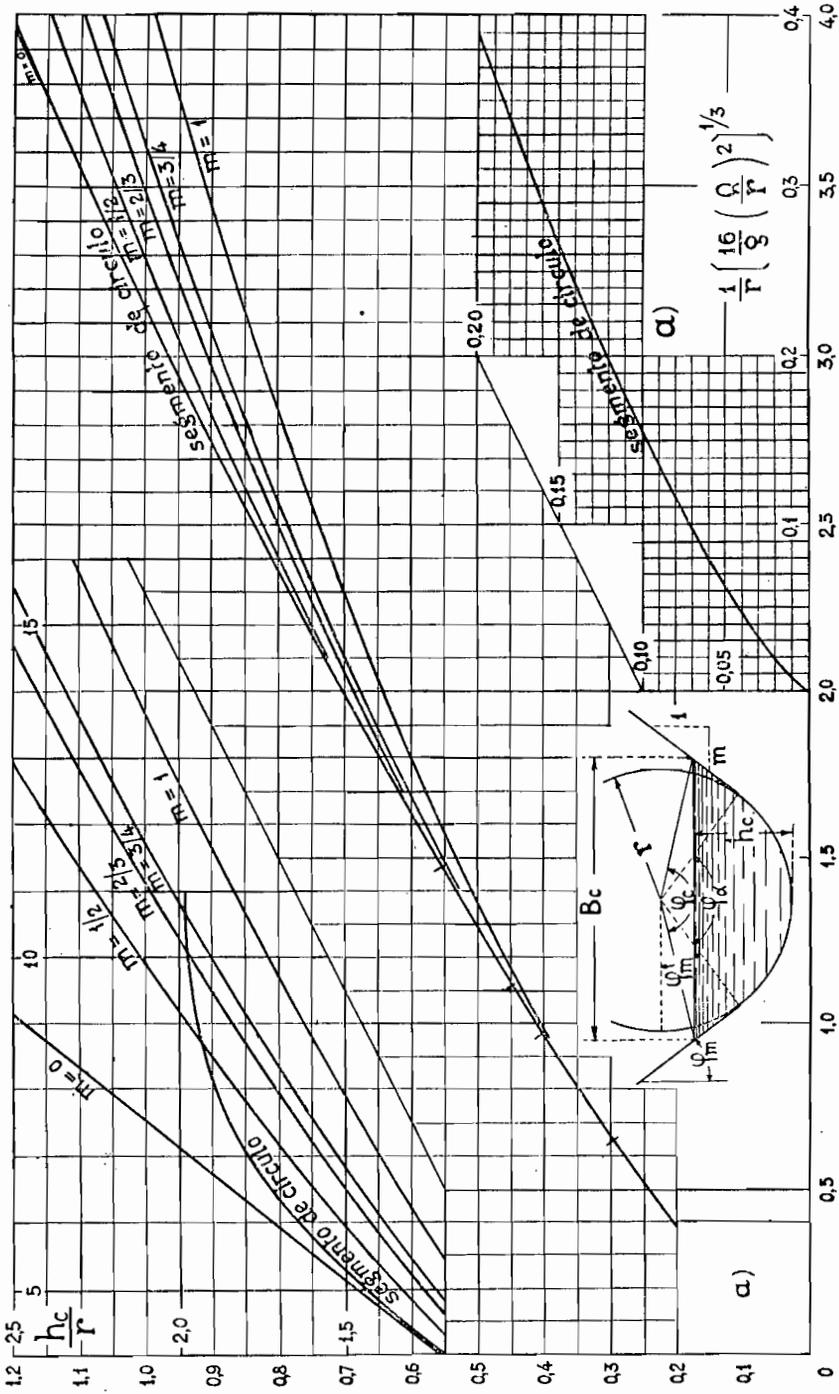


Figura 2

Secciones Tolvas

taludes	valores de:	$\frac{g n^2}{i r^{1/3}}$
m= 0	entre	0,14 y 0,553
1/4	entre	0,14 y 0,553
1/2	entre	0,13 y 0,59
2/3	entre	0,13 y 0,68
3/4	entre	0,12 y 0,72
1	entre	0,12 y 0,83
1 1/4	entre	0,11 y 0,91
1 1/2	entre	0,11 y 0,97
2	entre	0,10 y 1,02

Secciones segmento de círculo
entre 0,08 y 0,553

7. DISCUSIÓN

a) El escurrimiento del agua en régimen crítico presenta la posición de la superficie libre con variaciones debido a que las alturas líquidas próximas a la crítica, sea por encima o por debajo, poseen insignificante aumento de la energía propia. Las variaciones que se manifiestan en los componentes de la energía propia de los filetes líquidos son favorecidos en los sucesivos instantes por la turbulencia de las aguas, originándose ondulaciones superficiales que exigen mayores resguardos o francos en el canal, y el funcionamiento inconvenientemente agitado de las aguas atenta contra la buena conservación de la obra.

Siendo necesario apartarse de esa situación, el estudio de series de curvas de energía propia de las corrientes líquidas correspondientes a diversas formas de secciones de canales, permite adelantar como aceptables en principio y hasta tanto se señalen condiciones más precisas, a las que por sus elementos geométricos e hidráulicos cumplen para el escurrimiento del gasto máximo normal Q , la condición:

$$h + \frac{U^2}{2g} = 1,05 \left(h_c + \frac{\Omega_c}{2B_c} \right)$$

b) Para la corriente de gasto dado, escurriéndose en un canal de forma, aspereza y pendiente fijadas, el efecto que tiene la modificación de las dimensiones de la sección del canal sobre el valor de la relación $\frac{h}{h_c}$ es muy limitado.

En dichas modificaciones de las dimensiones del canal, los valores de $\frac{h}{h_c}$ son más altos a medida que el ancho superficial disminuye. En consecuencia, en el régimen torrencial, el canal de ancho superficial más angosto da lugar a una altura crítica más cercana a la superficie libre del agua, mientras que en el régimen subcrítico da lugar a un canal de altura crítica cada vez más alejada de la superficie libre del agua.

De lo expuesto se deduce que, si del cálculo del canal resultaran dimensiones hidráulicamente inconvenientes en cuanto se refiere a la cantidad relativa de energía propia de la corriente, habría que aumentar el ancho superficial de la sección mojada del canal en el régimen supercrítico y disminuirlo si el régimen es subcrítico. Pero como la variación de los valores de $\frac{h}{h_c}$ resultantes es muy limitada, por este camino pudiera llegarse a dimensiones del canal inaceptables por la desproporción de los elementos y la economía de la solución.

Lo correcto en tales casos es modificar el talud de la sección, si fuere posible, o cambiar la forma de la sección de manera que los valores del área mojada y del ancho superficial obedezcan a otras funciones de la profundidad del agua.

c) Si la aspereza de las paredes del canal pudiera variarse en el proyecto, a medida que el rozamiento aumenta, es mayor el valor de la relación $\frac{h}{h_c}$ que le corresponde a una corriente de gasto líquido dado, escurriéndose por un canal de forma, dimensiones y pendiente fijadas.

d) Si lo que pudiera variarse en el proyecto fuera la pendiente del canal, permaneciendo fijos los demás valores, a medida que aumenta la pendiente disminuye el valor de la relación $\frac{h}{h_c}$.

Abril de 1985.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ¹ JOSÉ S. GANDOLFO. *Canales de fuerte pendiente*. Boletín de la Administración Nacional del Agua N° 95, 1945, 19 págs.
- ² JOSÉ S. GANDOLFO. *Altura crítica en los escurrimientos superficiales*. Publicaciones de la Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas La Plata, 1940. Serie Segunda, 4, Revista, págs. 339 a 350.
JOSÉ S. GANDOLFO. *Idem*. 1944. Vol. II N° 5, págs. 517 a 535.