

~~Ing. SVIAT KROCHIN~~



ÁREA HISTÓRICA
DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL

Uno de los problemas que tiene que enfrentar el ingeniero hidráulico al construir canales consiste en el transporte de los sedimentos. Generalmente los canales son construidos en terrenos erosionables y muy pocos de ellos son revestidos. Es decir que si la velocidad sobrepasa un cierto límite, el agua comienza a destruir las paredes y el fondo del canal cambiando la alineación y a veces alterando completamente las condiciones para las cuales fue calculado. Por otro lado, una velocidad demasiado baja produce el depósito de los sedimentos disminuyendo la sección del canal y a veces azolvándolo por completo. La corrección de estos defectos es costosa y por eso desde hace mucho tiempo se ha estudiado la forma de crear un canal estable.

Por definición, un canal estable es aquel en el que no se presenta ni erosión ni azolvamiento. En otras palabras el canal está en equilibrio respecto a los sedimentos que arrastra en tal forma que la cantidad de material transportado permanece constante en tramos de igual caudal. La misma cantidad de sedimentos entra y sale del canal y si éste se divide en ramales, en cada división la cantidad de sedimentos se distribuye proporcionalmente a los caudales. Para conseguirlo es necesario que la velocidad sea lo suficientemente grande para arrastrar todos los sedimentos que lleva el agua sin llegar a erosionar ni las paredes ni el fondo del canal.

La mayor parte de estudios de esta clase de canales han sido hechos originalmente por ingenieros británicos en India, en conexión con los enormes proyectos de irrigación realizados en este país. Una cierta cantidad de estudios se hizo en Egipto en los trabajos de irrigación en el Nilo, y durante

este siglo un gran número de ingenieros investigaron el problema en Estados Unidos, en la Unión Soviética y en otros países.

El primer estudio sobre canales estables fue publicado por Kennedy en 1895. Su obra llegó a ser clásica en este campo y contribuyó a economizar grandes cantidades de dinero reduciendo el costo de la limpieza de canales en India y en otras partes. Como resultado de observaciones realizadas en los canales de irrigación del Punjab, Kennedy llegó a la conclusión que estos canales no producían erosión ni azolvamiento cuando la velocidad media estaba en cierta relación definida de la profundidad.

La explicación es que en todo canal hay corrientes transversales que mantienen los sedimentos en suspensión. La fuerza de estas corrientes es función de una cierta potencia de la velocidad y tienen un efecto mayor para pequeñas que para grandes profundidades. Por lo tanto, para dos canales de igual velocidad pero de distinta profundidad, el menos profundo podrá llevar en suspensión una cantidad de sedimentos mayor que el otro. Como resultado de sus mediciones, Kennedy encontró que para cada profundidad hay una velocidad límite por debajo de la cual comienzan a depositarse los sedimentos. Esta velocidad la llamó velocidad crítica. La fórmula desarrollada por Kennedy fue:

ÁREA HISTÓRICA
DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL
 $v_c = c h^n$

en la cual

v_c era la velocidad crítica en pies por segundo.

h la profundidad del agua en pies.

n un exponente asumido como constante e igual a 0.64.

c un coeficiente que depende de los sedimentos y que varía desde $c = 0.82$ para limo fino hasta $c = 1.09$ para limo arenoso grueso.

La ecuación desarrollada por Kennedy era empírica basada en observaciones de los canales de India. Después de él muchos otros investigadores de distintas partes del mundo desarrollaron ecuaciones del mismo tipo. Ninguna de estas ecuaciones tiene una aplicación universal pues todas dependen de condiciones locales. Aunque estas fórmulas son muy útiles para las condiciones para las cuales fueron desarrolladas, omiten generalmente factores importantes y de-

bido a eso son generalmente inaplicables para condiciones diferentes.

Es necesario hacer un análisis de los factores que controlan la forma de un canal en terreno erosionable y establecer las relaciones que existen entre unos y otros. Podemos dividir estos factores en tres grupos.

1.—Factores hidráulicos como la gradiente, la rugosidad, el radio hidráulico, la velocidad media, la distribución de velocidad, etc.

2.—La forma del canal, es decir la profundidad, el ancho y los taludes de los lados.

3.—Las características del material transportado como son el tamaño de las partículas, su granulometría, su forma, su peso específico, la concentración en el agua, etc.

Los factores hidráulicos tales como velocidad, gradiente, etc., son interdependientes y la relación entre ellos se conoce por las fórmulas comunes de velocidad tales como las de Manning o Bazin. La distribución de la velocidad es muy importante pero no puede ser expresada por medio de una fórmula igualmente sencilla.

La temperatura del agua podría ser un factor importante porque afecta la viscosidad del agua y por lo tanto la velocidad de sedimentación de las partículas. Sin embargo la variación de temperatura en los canales es generalmente pequeña y no produce efectos muy grandes.

Las dimensiones de las partículas son muy importantes como ha sido demostrado por numerosos estudios. La forma de las partículas también tiene su efecto pero todavía no se tienen datos suficientes al respecto y se considera de importancia secundaria.

La concentración, es decir la cantidad de los sólidos en movimiento, es muy importante. Existe el caso frecuente de los cauces naturales que eran estables y que comienzan a erosionarse severamente después de construirse una represa a través de ellos. Esto se debe a que el dique elimina los sedimentos aguas abajo y obliga a la corriente a colmar su capacidad transportadora erosionando el cauce. El caso contrario es de la excesiva concentración de sedimentos que obliga a poner un desarenador para evitar el azolvamiento.

Si la función general del transporte de sedimentos pudiera ser expresada en una forma explícita, el problema del depósito en los canales no presentaría dificultades. Una fórmula general de esta índole no se conoce y por eso es ne-

cesario usar ecuaciones empíricas. En 1940 Straub indicó que son los sedimentos arrastrados cerca del fondo los que tienen una primordial importancia en la estabilidad de un canal y usó la fórmula relativamente simple de Du Boys:

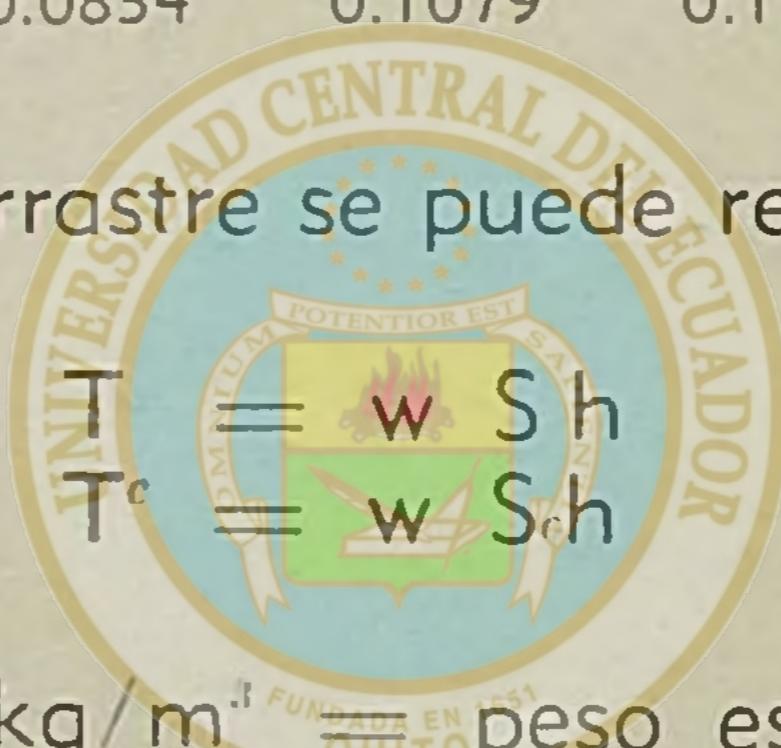
$$q_s = C_s T (T - T_c)$$

Siendo q_s el volumen en metros cúbicos por segundo del material sólido transportado por metro de ancho de canal, T el esfuerzo cortante que soporta la superficie mojada, T_c el esfuerzo cortante crítico y C_s un coeficiente que depende del material en que se excavó el canal.

Tanto C_s como T_c han sido calculados para distintos diámetros de partícula.

diámetro en mm	0.125	0.25	0.5	1	2	4
C_s en $m^3/kg^2\text{-sec}$	0.003145	0.001865	0.001126	0.000660	0.000389	0.000233
T_c en kg/m^2	0.0785	0.0834	0.1079	0.1570	0.2500	0.4410

El esfuerzo de arrastre se puede representar como:



Siendo $w = 1.000 \text{ kg/m}^3$ peso específico del agua.

S = la gradiente del canal.

S_c = la gradiente por debajo de la cual comienza la sedimentación y que llamamos crítica.

h = la altura o profundidad del agua en metros.

Reemplazando los valores tendremos

$$q_s = C_s w^2 h^2 S^2 (1 - S_c/S) \quad (1)$$

Según la ecuación de Manning, para los canales se tiene:

$$v = \frac{1}{n} r^{2/3} S^{1/2}$$

Para canales cuyo ancho excede en mucho a la altura se puede considerar que el radio hidráulico "r" es igual a la altura "h". Entonces la descarga por un metro de ancho de canal será:

$$q = c h^{3/2} S^{1/2} \quad (2)$$

siendo

$$C = \frac{1}{n} h^{1/6}$$

Dividiendo la primera ecuación para la segunda se obtiene que la concentración de los materiales llevados por el agua es:

$$q_s/q = (C_s/C) w^2 h^{1/2} S^{3/2} (1 - S_e/S)$$

Según Straub:

$$C_s = 0.00066 / d^{3/4}$$

$$(d + 0.65)$$

$$S_e = 0.000095 \frac{h}{d}$$

Siendo "d" el diámetro de la partícula de sedimento en milímetros. Entonces, reemplazando los valores, tendremos:

$$\frac{q_s}{q} = \frac{0.0006 n w^2 h^{1/2} S^{3/2}}{d^{3/4}} (1 - S_e/S)$$

La concentración q_s/q generalmente se representa en partes por millón o en porcentaje.

Si se despeja la gradiente de la fórmula de Manning y se la reemplaza en la ecuación anterior, se tiene para la velocidad:

$$v = \left(\frac{q_s}{q} \right)^{1/3} \frac{0.115 d^{1/4}}{n^{1/3} (1 - S_e/S)} h^{5/9} = 0.56$$

A pesar de las faltas de exactitud numéricas y la naturaleza muy simplificada de la ecuación de Du Boys, la última fórmula se la puede aceptar como cualitativamente correcta.

Comparándola con la fórmula original de Kennedy $v = c h^n$ vemos que este investigador había tomado el valor de "c" como dependiente únicamente del tamaño del sedimento mientras que en realidad depende de muchos otros factores. Es por esto que la ecuación de Kennedy se puede

aceptar sólo para el caso particular de un canal con características dadas y una concentración de sedimentos determinada. En el caso general del valor de la constante depende de la concentración, de la gradiente y de la rugosidad. Se observa que la cantidad de material arrastrado disminuye con el tamaño de las partículas y aumenta con la gradi-
ente y la rugosidad.

La ecuación representa las condiciones estables en las cuales existe equilibrio entre los sedimentos y la corriente. Se ha considerado que cualquier otro valor de velocidad produciría erosión o azolvamiento. En realidad la potencia que requiere el agua para mantener una partícula en movimiento es mucho menor que la que necesita para arrancarla del lecho. Es por eso que hay un amplio margen de valores entre la velocidad que empieza a depositar el material y la velocidad que erosiona el canal. Esto puede ser demostrado por el hecho que mientras menor es el diámetro de la partícula, menor es la velocidad requerida para mantenerla en suspensión y sin embargo los canales construidos en arcilla compacta, compuesta de partículas muy finas, pueden resistir velocidades de hasta 1.2 m/s. mientras que los canales en arena se erosionan con 0.6 m/s. La razón para esto es que para el transporte de las partículas la única fuerza que debe ser vencida es la de la gravedad mientras que para la erosión debe ser vencida la fuerza de la cohesión entre las partículas y que es mucho más grande. Es por eso que uno de los factores más importantes para la construcción de canales resistentes a la erosión es la clase de terreno en donde se excava el canal. Una tierra de la misma granulometría resiste mucho más a la erosión si está compactada que si está floja. Con el transcurso del tiempo, muchos canales adquieren una alta resistencia a la erosión debido a la cementación producida por el depósito de material muy fino llevado por el agua. A veces se toma en cuenta esta resistencia creciente a la erosión diseñando los canales para las condiciones de óptima resistencia, operando el canal por debajo de su capacidad máxima y gradualmente aumentando la descarga a medida que el canal se estabiliza por sí mismo.

Una determinada sección de canal puede servir solamente para una sola descarga. Los cauces naturales alteran su sección hasta que sea adecuada para el caudal que llevan. Como la velocidad aumenta siempre que hay una contracción de la sección, los cauces naturales tienden a pro-

ducir erosión en las partes angostas o poco profundas y a depositar materiales en las partes anchas o profundas. De esta manera un río tiende a igualar sus secciones. Si las áreas de las secciones transversales son iguales aunque la forma sea diferente, la velocidad media será igual. Pero en este caso habrá sedimentación en las partes más profundas con la consiguiente reducción de sección y el aumento de velocidad que tenderá a erosionar los lados. Es decir que las secciones transversales tienden a uniformar no sólo su área sino también su forma.

Esto demuestra que los cauces naturales tienden a adoptar la forma más estable por la interacción entre la corriente de agua y el terreno. Si la forma del cauce no conviene a la corriente sea por una excesiva curvatura, o alguna obstrucción o cualquier otro fenómeno que produzca una pérdida de carga excesiva, entonces la corriente tenderá a alterar el cauce hasta que las condiciones sean más convenientes. La forma del cauce resultante será siempre tal que la pérdida de energía sea la mínima. Una vez que la corriente ha adoptado su cauce y forma más estables tenderá a mantenerse en equilibrio. Cualquier cambio en los factores que controlan la forma del cauce desplazará el equilibrio en una dirección tal que tienda a absorber y eliminar los efectos del cambio.

En los canales artificiales la corriente también tiende a adoptar la forma más ventajosa. La diferencia con los ríos naturales está principalmente en la pendiente longitudinal. Un sistema de canales de irrigación empieza con el máximo caudal en la toma y aguas abajo se va dividiendo gradualmente en canales laterales más pequeños. Generalmente es necesario dar gradientes mayores a los canales laterales que al principal y por eso, debido al hecho que el caudal va disminuyendo a medida que el canal avanza el perfil longitudinal resulta convexo para arriba. En los ríos el caudal aumenta aguas abajo y las pendientes en las cabeceras son mayores que en la desembocadura o sea que el perfil longitudinal es cóncavo para arriba.

Debe haber alguna sección ideal a la cual tiendan todos los canales que llevan la misma cantidad de sedimentos. Sin embargo parece que las distintas autoridades no se han puesto de acuerdo sobre la forma de esta sección.

La tendencia original en el diseño era hacer los canales angostos y profundos, asegurando así una mejor sección

el caso de riego con el objeto de dominar una extensión de terreno tan grande como sea posible.

2.—Cuando los canales se usan para llevar el agua a una elevación menor en una distancia tan corta como sea posible, entonces es cuestión de aumentar la gradiente al máximo para disminuir el costo de estructuras especiales.

3.—Cuando en el diseño del canal la gradiente no es de primordial importancia, se los diseña en tal forma de conseguir un costo mínimo de excavación.

Si el agua que entra en el canal no lleva sedimentos en suspensión entonces hay que cumplir con la condición adicional de que no haya erosión. Si en cambio la cantidad de sedimentos es apreciable el diseño debe hacerse en tal forma que la capacidad transportadora de la corriente sea igual o mayor que la cantidad de material que entre en el canal.

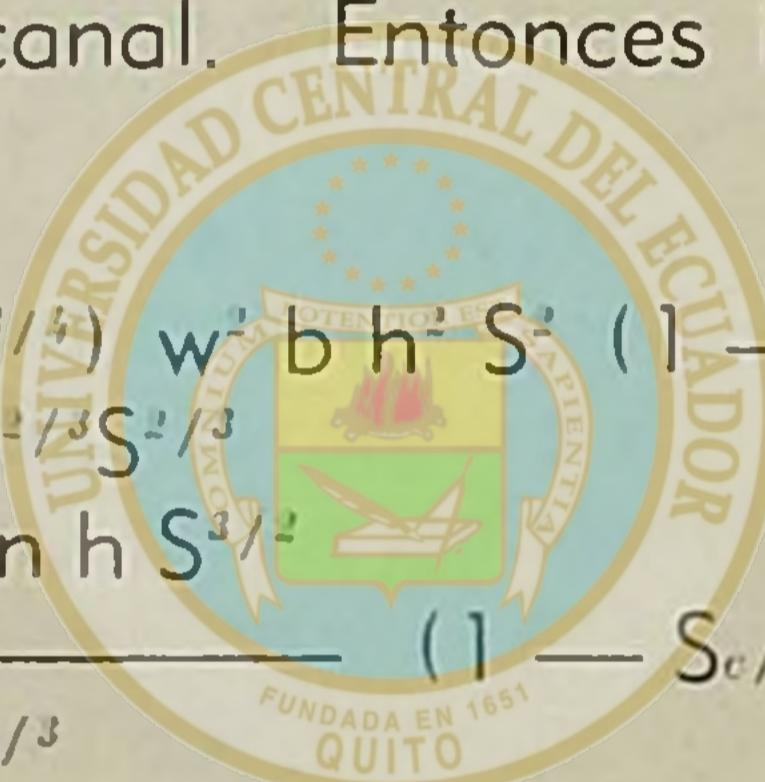
Para usar las fórmulas de Straub hay que partir de la suposición que como profundidad puede tomarse la profundidad media del canal. Entonces los caudales totales serán:

$$Q_s = (0.00066/d^{3/4}) w^2 b h^2 S^{1/2} (1 - S_c/S)$$

$$Q = (1/n) b h r^{2/3} S^{2/3}$$

$$Q_s = 0.00066 w^2 n h S^{3/2}$$

$$y = \frac{Q_s}{d^{3/4} r^{2/3}} (1 - S_c/S)$$



ÁREA HISTÓRICA

DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL

En los canales de pendiente máxima, el factor límite es la resistencia a la erosión. Si el agua es limpia, es decir, si no existen sedimentos en suspensión ($Q_s = 0$) entonces la gradiente no debe ser mayor que la gradiente crítica. Si el agua no es limpia sino que lleva cantidad apreciable de sedimentos, entonces el valor Q_s/Q debe ser determinado experimentalmente en el canal. La resistencia a la erosión depende no solamente de la concentración sino también del tipo de material. Si el material traído por el agua y el material que forma el terreno son de la misma clase, entonces mientras mayor la cantidad de sedimentos llevados por el agua, mayor puede ser la pendiente sin que se produzca erosión. Cuando los canales se diseñan para la pendiente máxima se suele hacerlos anchos y de pequeña profundidad con el objeto de reducir el radio hidráulico y disminuir la velocidad. Teóricamente no hay límite para esta reducción de "r", pero en la práctica se ha visto que para profundidades

muy pequeñas las irregularidades de la construcción se hacen muy importantes ya que el agua se encauza en ellas erosionándolas y transformándolas en zanjas profundas. Esto se debe a que para una velocidad dada, la gradiente de velocidad dv/dy junto a la solera es más grande para las pequeñas profundidades que para las grandes, produciendo consiguientemente una mayor turbulencia y por lo tanto una más fuerte erosión.

Los canales de gradiente intermedia se diseñan en la misma forma que los de pendiente máxima con la diferencia de que la gradiente está generalmente fijada por la topografía de modo que el criterio para el diseño es la selección de una sección mínima para un radio hidráulico dado.

Para los canales de gradiente mínima el procedimiento depende otra vez de si el agua que entra es limpia o turbia. Si el agua es limpia, la gradiente escogida debe ser la crítica o un poco mayor. Si hay una cantidad apreciable de material en suspensión, entonces muchas veces es necesario impedir que el material entre al canal o sedimentarlo al principio del mismo. Lo primero se consigue colocando un vertedero a la entrada del canal de tal manera que todo el material grueso se deposite agua arriba y sólo pase el material muy fino. Estos materiales depositados aguas arriba del vertedero se lavan periódicamente por medio de una compuerta lateral. Si el material fino que pasa por el vertedero es todavía perjudicial por su acción abrasiva sobre la maquinaria hidráulica o inconveniente para las tierras de cultivo, entonces es preciso eliminarlo por medio de un desarenador, es decir una estructura en la cual la velocidad se reduce a su mínimo valor por el tiempo más prolongado posible.

BIBLIOGRAFIA

E. S. Bellasis.—River and Canal Engineering.—1913.

Carl. B. Brown.—Sediment Transportation. Engineering Hydraulics.—1949.

Fortier and Scobey.—Permissible Canal Velocities Trans. ASCE Vol. 89.—1926.

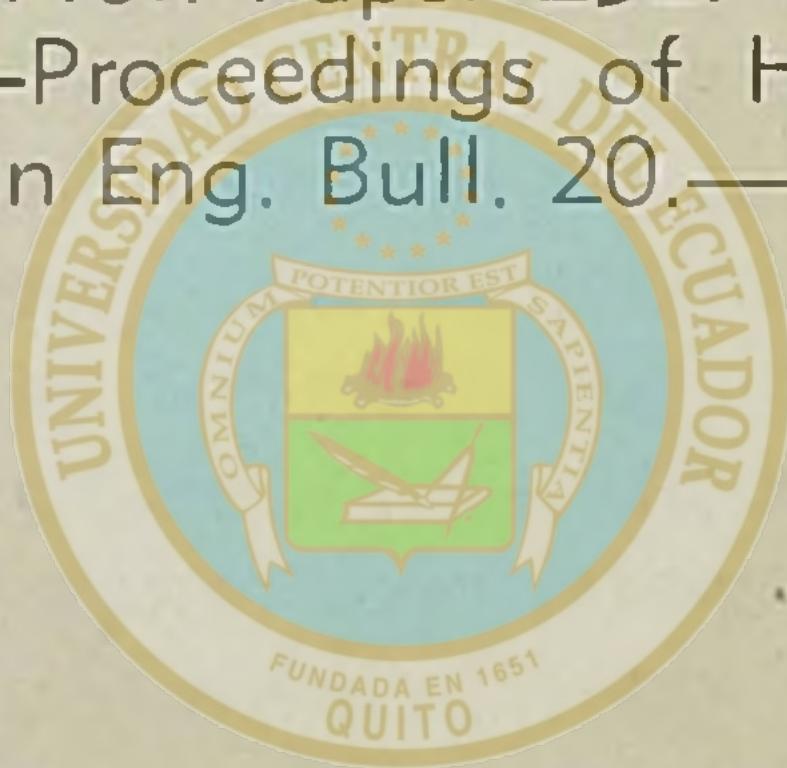
W. M. Griffith.—A theory of silt and scour Proceedings I.C.E. Vol. 223.—1926.

Gerald Lacey.—Stable Channels in Alluvium Min. of Proc. I.C.E. Vol. 229.—1930.

E. W. Lane.—Stable Channels in erodible material Trans. ASCE. Vol. 102.—1937.

Leopold and Maddock.—Hydraulic Geometry of Stream Channels Geol. Srv. Prof. Paper 252.—1953.

L. G. Straub.—Proceedings of Hydraulic Conference Univ. of Iowa Stud. in Eng. Bull. 20.—1940.



ÁREA HISTÓRICA
DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL