

# Notas sobre conducciones a lámina libre. (\*)

Por LUIS TORRENT RODRIGUEZ

Dr. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

*A partir de la tradicional fórmula de Chezy para el cálculo hidráulico de conducciones en lámina libre, se pasa revista a aspectos tan importantes para el proyecto como son los de radio hidráulico, rugosidad del cauce y factores técnicos y económicos de los canales, tanto desde el punto de vista de su construcción como de su explotación y conservación. Se dan fórmulas y abacos para facilitar la comparación entre unos y otros tipos de perfil transversal de las conducciones, incluida la sección circular completa, en lámina libre. Asimismo se proporcionan unos gráficos que permiten evaluar el coeficiente n de la fórmula de Manning para el cálculo hidráulico de conducciones.*

## 1. LA FORMULA DE CHEZY

Como es bien sabido, la velocidad de circulación del agua por un conducto es función de su pendiente piezométrica y del llamado "radio hidráulico", que se define como la relación entre el área de la sección transversal que ocupa el líquido y su contorno sumergido.

Algunos autores han señalado la inconveniencia de esa definición, pues conduce a que el radio hidráulico de una tubería circular es la mitad de su radio geométrico y, en consecuencia, el diámetro del tubo es el cuádruplo de aquél; pero las cosas están así desde hace más de dos siglos — quizá debido a una confusión semántica entre "ratio" y "radius" —, y cualquier cambio de denominación sólo produciría desconcierto e incertidumbre.

En efecto, la fórmula de D. Antonio Chézy, aceptada por todos los investigadores en el campo de la Hidráulica, data de 1755 (o tal vez de un par de años antes, según tratados alemanes que citan al ingeniero Brahms como precursor de la misma).

La fórmula reza:

$$V = C \sqrt{Ri} \quad (1)$$

en la que V es la velocidad de la corriente; R es el radio hidráulico; i, la pendiente; y C un "coeficiente" que, a su vez, es función de R y de la rugosidad del cauce.

## 2. PROTAGONISMO DEL RADIO HIDRAULICO

No deja de sorprender que la capacidad de un conducto sea independiente de la forma de su sección; que dé lo mismo si se trata de un cajón cuadrado, de 3 m x 3 m, que de un trapecio con una anchura cinco veces mayor que su calado; que sea igual la hidraulicidad de un canal circular de 1,60 m de flecha y 8,20 m de luz, que la de un tubo de 3,43 m de diámetro, ocupado con agua hasta cerca de la clave, con una superficie libre mitad de su diámetro. (En los cuatro ejemplos, el radio hidráulico es de 1 m).

Las corrientes en cauces abiertos tienen líneas isotacas que son, también, abiertas, y la velocidad máxima se produce en la superficie del líquido; mientras que, en los conductos encajonados, el máximo se alcanza en un punto interior de la sección, que puede estar hasta un 30% por debajo del nivel del agua. Parece que todo ello debería repercutir en el comportamiento hidráulico de las conducciones; el rozamiento con el aire, aunque sea secundario, como señalan algunos autores, se aplica a superficies muy diferentes, según sea el tipo de cauce; la proximidad de los cajeros, que afectan con su rugosidad a todos los puntos de la corriente, queda debilitada por la distancia y prácticamente anulada en la zona central de los canales anchos.

Sin embargo, no se tiene en cuenta la forma de la sección transversal en los cálculos habituales de conducciones, salvo en algunos cauces muy singulares, que han sido objeto de estudios particulares por especialistas en la materia. Todo lo

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de agosto de 1991.

cual viene a resaltar la extraordinaria intuición que tuvieron los sabios hidráulicos Chézy y Brahms, cuando atribuyeron al radio el papel estelar en el cálculo de la velocidad del flujo.

Y, no obstante, la deducción de la fórmula de Chézy no se basó en estudios profundos, sino en cálculos elementales de las fuerzas que actúan sobre un prisma líquido que circula por un conducto. Realmente, la intuición de D. Antonio fue establecer, sin apenas datos experimentales, que el rozamiento frenador del movimiento del agua es proporcional al cuadrado de su velocidad (lo que es relativamente cierto).

La aceptación general que tuvo la fórmula se debió, principalmente, a que acabó, de una vez y para siempre, con las teorías de la escuela italiana, que seguía aferrada a las erróneas premisas hidráulicas de Galileo y Torricelli.

### 3. LA RUGOSIDAD DEL CAUCE

También llama la atención el hecho de que durante los 100 años que median entre Chézy y las experiencias de Bazin, la mayoría de los hidráulicos no aceptara que la naturaleza del cauce influye en el "parámetro" de la fórmula, pues creían que las irregularidades del contorno quedaban siempre cubiertas por una película estacionaria de agua. De ahí las numerosas expresiones "universales" que propusieron para el "coeficiente" C, alguna de las cuales, como la de Tadini ( $V = 50 \sqrt{Ri}$ ), ha perdurado hasta este siglo.

Una vez que los trabajos de Bazin y Darcy pusieron de manifiesto que la circulación del agua depende, en gran parte, de la rugosidad del perímetro mojado, aparecieron numerosas formulaciones para determinar el valor del "coeficiente" (\*), según la naturaleza y la calidad de ejecución de los revestimientos y, todavía en mayor número, se propusieron expresiones binomias del tipo:

$$V = k R^\alpha i^\gamma \quad (2)$$

con parámetros deducidos experimentalmente por sus autores en laboratorios, tuberías comerciales, ríos y canales de riego o de navegación, tanto para regímenes turbulentos y laminares,

como para los situados en la zona intermedia, de "turbulencia lisa", que en un trabajo anterior se ha calificado de "sosegada".

El índice  $\alpha$  que afecta al radio hidráulico no es igual en las expresiones más conocidas de este tipo, fluctuando entre 0,68, de la fórmula de Scimemi para tubos de amianto-cemento, y 0,58, en la de Scobey de tuberías metálicas (tampoco en todas ellas es constante el exponente de la pendiente). En fórmulas más complejas, como son las de Bazin, Ganguillet-Kutter y sobre todo, en las derivadas de los trabajos de Kármán, Prandtl, Colebrook, etc., intervienen el radio hidráulico y su raíz cuadrada como sumandos y como factores en fracciones o en expresiones logarítmicas, lo que hace inviable la acotación precedente. No obstante, es posible hacer concordar los resultados de estas fórmulas complejas con los obtenidos mediante binomias del tipo (2) en una amplia gama de dimensiones y velocidades, resultando expresiones en las que el exponente del radio está comprendido entre 0,60 y 0,63 (\*). Concretamente, en conductos a lámina libre cuyo revestimiento suele ser mucho más rugoso que el de las tuberías, el caudal es, prácticamente, proporcional a la potencia 0,6 del radio hidráulico.

El protagonismo de este parámetro del cauce queda así parcialmente atenuado por su exponente y, a la hora de analizar las características de un conducto, la condición de que el radio sea máximo no debe influir fundamentalmente en el proyecto. En canales de sección trapecial, la búsqueda del radio óptimo carece de interés frente a otros condicionantes de la conducción, como es la adecuación del talud de los cajeros a la naturaleza y a la topografía del terreno por el que discurre, la anchura de la solera que permita el paso de vehículos durante y después de la construcción, o el calado, que afecta a la carga sobre el revestimiento, a la subpresión, a la erosión, a las obras complementarias e incluso a la superficie regable dominada por el canal o al salto útil. El coste de las obras depende fundamentalmente de estos tres condicionantes, que determinan los volúmenes de explanación y excavación, espesores del revestimiento, disposición y número de juntas, drenes, obras de cruce de caminos y cauces, tamaño de compuertas, etc.

(\*) La insistencia en entrecorrer "coeficiente" se debe a que C tiene dimensiones  $L^2/T^2$ , o sea como la raíz cuadrada de una aceleración.

(\*) "Fórmulas hidráulicas de conducciones. Comentarios y acotaciones". Revista de Obras Públicas. Agosto 1983.

4. SECCIONES TRAPECIALES "OPTIMAS"

Por otra parte, la variación del radio hidráulico de las secciones trapeziales es muy poco pronunciada a partir de sus valores máximos, como puede apreciarse en el Gráfico n.º 1 adjunto, en el que se han trazado las curvas de igual radio para secciones de superficie unitaria, en función del talud  $m$  de los cajeros y de la relación de solera a calado ( $\beta = b/h$ ).

$$\frac{R}{\sqrt{S}} = \frac{\sqrt{\beta + m}}{\beta + 2\sqrt{m^2 + 1}} \quad (3)$$

La sección trapezoidal "óptima", que citan algunos libros de hidráulica, tiene un radio que es la mitad del calado y la superficie del agua es igual a la suma de los cajeros mojados. La condición es:

$$\beta = 2(\sqrt{m^2 + 1} - m) \quad (4)$$

cuya curva se ha trazado en el gráfico. Para los taludes más usuales, la relación solera/calado resulta menor que la unidad, a la que se llega

cuando  $m$  vale 0,75. Al aumentar los valores de  $\beta$ , los cajeros son cada vez más escarpados, terminando en sección rectangular para  $\beta = 2$ .

Un talud de 3:2 da el radio "óptimo" si la relación solera/calado es de 0,6, lo cual puede no ser conveniente en muchos casos. Para llegar a una sección cuyo calado sea la mitad de la solera, la disminución del radio hidráulico es algo mayor del 3%, lo que supone una merma de la capacidad del 2% escaso, que se compensará incrementando las dimensiones del canal en un 0,7%.

También se señala en el gráfico la curva que proporciona el máximo radio en función de  $\beta$ , que corresponde a:

$$\beta = 2 \frac{m^2 - 1}{4m - \sqrt{m^2 + 1}} \quad (5)$$

que queda limitada entre el talud de  $45^\circ$  y  $m = \sqrt{15}$  ( $75^\circ 33'$ ). La curva corta a la anterior en el punto correspondiente al semi-hexágono regular.

La sección trapezoidal en la que es mínima la relación entre el perímetro mojado y el calado, es la inscrita en un semicírculo

$$\beta = \frac{1}{m} - m \quad (6)$$

Su curva no se representa en el gráfico porque la condición que la define no parece tener mayor interés y, además, está tan próxima a la (5) que casi se confunde con ella en una gran parte de su trazado.

Por último, los puntos en que es máxima la relación entre el radio y el calado están situados sobre la línea definida por:

$$m = \frac{4 + \sqrt{4 + 3\beta^2}}{3\beta} \quad (7)$$

que tiene como asíntota  $m = \frac{1}{\sqrt{3}}$ . La construcción gráfica de esta sección se realiza mediante el esquema señalado. Su radio hidráulico vale

$$\frac{h}{2 \cos \alpha} = \frac{\sqrt{1 + m^2}}{2m} h.$$

RADIO HIDRAULICO DE CANALES TRAPECIALES DE SECCION UNITARIA

$$R_h = \frac{\sqrt{\beta + m}}{\beta + 2\sqrt{m^2 + 1}} \sqrt{S}$$

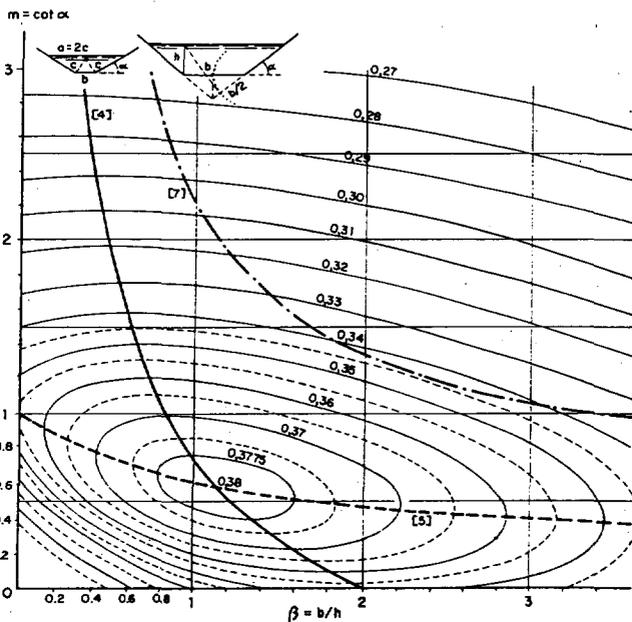


Gráfico 1

## 5. LA HIDRAULICIDAD DE LOS CANALES CIRCULARES

Si la elección de sección trapecial de un canal no debe basarse en su hidraulicidad "óptima" que, como se acaba de ver, tiene muy escasa trascendencia en el proyecto, tampoco parece que la decisión entre sección trapecial o circular deba depender de una pequeña diferencia de radio hidráulico, frente a otros condicionantes de la conducción.

Definida la sección circular por su radio geométrico  $r$  y su ángulo en el centro  $\gamma$  (radianes), la igualación de superficie transversal y de radio hidráulico respecto a la trapecial conduce a las ecuaciones

$$\begin{aligned} r^2 (\gamma - \text{sen } \gamma) &= 2 (b + mh) h \\ r\gamma &= b + 2 \sqrt{m^2 + 1} h \end{aligned} \quad (8)$$

Para la sección trapecial óptima, se obtiene:

$$\gamma - \text{sen } \gamma = \frac{1}{2} \frac{\gamma^2}{2 \sqrt{m^2 + 1} - m} \quad (9)$$

Por cada talud  $m$  de la trapecial hay una sección circular equivalente, tanto en área como en radio hidráulico; pero los ángulos en el centro de éstas son, en general, menores que los usuales en canales de directriz circular. La relación entre cuerda y flecha suele estar comprendida entre 3,3 y 3,75, que corresponden a ángulos centrales de  $112^\circ$  a  $124^\circ$ . Dentro de estos límites, las únicas secciones trapeciales que pueden ser equivalentes tienen que tener taludes de  $45^\circ$  o más escarpados.

Precisamente, una de las ventajas de la sección curva es su resistencia estructural en terrenos poco consistentes; es decir, en aquéllos en los que el talud del canal tradicional tendría que ser mayor que la unidad, llegando con frecuencia al de 3:2. Para estos casos, la substitución de una sección por otra no puede ser equivalente en área transversal y radio hidráulico. La comparación entre estos canales trapeciales y las secciones circulares de ángulo en el centro habitual, se tendrá que basar en la igualdad de capacidades de ambos conductos para poder cuantificar si la diferencia de dimensiones que resulte —y su repercusión económica—, justifica o no la innovación técnica que se introduce al adoptar secciones curvilíneas, tanto desde el punto de vista constructivo, como de conservación y reparación del canal, en caso de averías.

Una forma de establecer la comparación puede ser la de igualar previamente las secciones, definidas por  $m$  y  $\gamma$ , obtener la relación entre radios

hidráulicos  $\frac{R_c}{R_t}$  y, a continuación, ampliar la

sección trapecial por medio de una homotecia cuya razón  $\eta$ , para que resulten iguales las capacidades, debe ser:

$$\eta = \left( \frac{R_c}{R_t} \right)^{\left( \frac{\alpha}{2 + \alpha} \right)} \quad (10)$$

siendo  $\alpha$  el exponente del radio de la fórmula (2), que es función de la rugosidad del revestimiento del canal, como se señaló previamente (si bien, para estos efectos, su variabilidad apenas tiene trascendencia).

Para rugosidades del cauce de 2 mm, que es normal en canales con varios años de uso, el exponente  $\frac{\alpha}{2 + \alpha}$  resulta 0,2355. Si se emplea la

fórmula de Manning, el índice sería 0,25.

Por consiguiente, aunque una conducción circular tuviera un radio muy superior al de otra trapecial, por ejemplo, un 9% mayor, no es preciso incrementar esta última en esa proporción para conseguir la misma capacidad, sino que basta un aumento de la sección del 4,1% para lograrlo (lo que representa un incremento de 2,05% de las dimensiones lineales).

En los cuadros 1 y 2 se comparan canales circulares de ángulos comprendidos entre  $112^\circ$  y  $124^\circ$  y cauces trapeciales de taludes 1:1, 5:4 y 3:2. Se indica la relación entre secciones útiles que dan igual caudal, la de anchuras de caja y la de perímetros mojados. En el primero, que corresponde al trapecio "óptimo", se da también la relación entre calados. En el otro, las secciones tienen igual tirante de agua, por lo que no se ha aplicado el procedimiento homotético antes descrito, sino que se ha ensanchado la solera trapecial hasta conseguir la igualación de capacidades. Las ecuaciones correspondientes son:

$$h = r (1 - \text{cos } \gamma / 2)$$

$$\frac{r^{2 + \alpha} (\gamma - \text{sen } \gamma)^{1 + \alpha}}{2^{1 + \alpha} \alpha} = \frac{[(b + mh) h]^{1 + \alpha}}{(b + 2 \sqrt{m^2 + 1} h)^\alpha} \quad (11)$$

1. CANALES TRAPECIALES "OPTIMOS" Y CIRCULARES DE IGUAL CAPACIDAD

ARCO CIRCULAR	TALUD TRAPECIAL	$R_{CIRC}/R_{TR}$ (AREAS IGUALES)	INCREMENTO SECCION	ANCHO TR/CUERDA	CALADO TR/FLECHA	PERIMETRO TR/ARCO ( $\eta$ )
112°	1:1	0,9917	0,9961	0,9025	1,2001	0,9980
116°	1:1	1,0022	1,0010	0,9257	1,1809	1,0005
120°	1:1	0,0119	1,0056	0,9401	1,1624	1,0028
124°	1:1	0,0210	1,0098	0,9726	1,1445	1,0049
112°	5:4	1,0245	1,0115	0,9964	1,1707	1,0057
116°	5:4	1,0354	1,0165	1,0221	1,1519	1,0082
120°	5:4	1,0455	1,0212	1,0479	1,1338	1,0105
124°	5:4	1,0548	1,0254	1,0738	1,1164	1,0126
112°	3:2	1,0642	1,0297	1,0900	1,1372	1,0148
116°	3:2	1,0754	1,0349	1,1181	1,1189	1,0173
120°	3:2	1,0859	1,0396	1,1463	1,1014	1,0196
124°	3:2	1,0956	1,0440	0,1747	1,0844	1,0217

2. CANALES TRAPECIALES Y CIRCULARES DE IGUAL CAPACIDAD Y CALADO

ARCO CIRCULAR	TALUD TRAPECIAL	$R_{TR}/R_C$	INCREMENTO SECCION TR/CIRC	ANCHO TRAP/CUERDA	PERIMETRO TRAP/ARCO	b/h
112°	1:1	0,9932	1,0042	0,9500	1,0111	1,655
116°	1:1	0,9875	1,0078	0,9887	1,0205	1,567
120°	1:1	0,9821	1,0112	1,0058	1,0296	1,484
124°	1:1	0,9772	1,0143	1,0232	1,0380	1,406
112°	5:4	0,9721	1,0176	1,0477	1,0468	1,441
116°	5:4	0,9661	1,0215	1,0676	1,0573	1,352
120°	5:4	0,9606	1,0251	1,0878	1,0671	1,268
124°	5:4	0,9555	1,0285	1,1084	1,0764	1,189
112°	3:2	0,9474	1,0338	1,1255	1,0913	1,234
116°	3:2	0,9412	1,0380	1,1486	1,1028	1,144
120°	3:2	0,9355	1,0419	1,1719	1,1138	1,060
124°	3:2	0,9302	1,0456	1,1957	1,1241	0,980

en las que, haiendo  $r = 1$ , sólo queda como incógnita la solera b del canal.

En ambos cuadros se observa que el incremento de sección útil necesario para igualar capacidades, es de poca importancia. También en el primer caso es irrelevante el aumento de perímetro mojado (la relación es la razón de homotecia  $\eta$ ); pero, en cambio, la sección circular permite un menor calado y, sobre todo, una anchura menor de cauce. Esta diferencia se acentúa en el segundo cuadro, que también señala un apreciable aumento del perímetro trapezial al tender los taludes y crecer el ángulo central del arco.

6. ECONOMIA DE DIMENSIONES DEL CANAL CIRCULAR

Aunque en los dos cuadros comparativos están reflejadas las diferencias entre unas y otras secciones en cuanto a la hidraulicidad de su área útil, queda incompleto el análisis, al no considerar otros condicionantes del canal, como son la altura del resguardo por encima del nivel del agua y el revestimiento del cauce. Al tener en cuenta el resguardo, la diferencias se acentúan, por ser más escarpado el circular que el trapezial en todos los casos estudiados. El volumen del revestimiento

es siempre mayor en las secciones tradicionales comparadas, a igualdad de espesor. Si, además, se admite que espesores y resguardos mantienen una cierta proporcionalidad con el calado, las secciones "óptimas" resultan mucho más desfavorecidas en la comparación que las trapeciales del mismo calado que las circulares, tanto en lo que respecta al área de excavación, como a la de revestimiento, con una escasa ventaja en cuanto al ancho de la sección total. Por ello, se omite el cuadro comparativo correspondiente y sólo se ofrecen las relaciones de anchura, volúmenes de excavación y de revestimiento de secciones trapeciales y circulares de igual tirante de agua, con un resguardo equivalente al 15% de éste, y supuesto un espesor de revestimiento del 6% del calado, que es válido en canales de dimensiones medias.

Para la sección completa, siempre resulta mayor la anchura de las trapeciales, en porcentajes variables entre 1 y 29%. El incremento de excavación, variable con el talud, tiene un máximo del orden del 8% y el exceso de volumen de revestimiento, por metro lineal, fluctúa entre el 3 y el 16,5%.

Los resultados del cuadro 3 se recogen en el Gráfico n.º 2 adjunto, en el que se señalan las reducciones porcentuales de sección, anchura y revestimiento que se pueden lograr al substituir los canales trapeciales por los de directriz circular. Las disminuciones son, prácticamente, linea-

les respecto a la amplitud del arco, lo que permite una rápida interpolación para cualquier otro ángulo central.

Por medio del gráfico o del cuadro se puede tener una aproximación en cuanto a las diferencias dimensionales de una u otra solución del canal; lo cual puede no tener una repercusión proporcional en la economía del proyecto, pues los precios de las unidades de obra, tanto de excavación de caja, como de refino de la misma y de revestimiento, no tienen que ser iguales, necesariamente, en ambos tipos de obra.

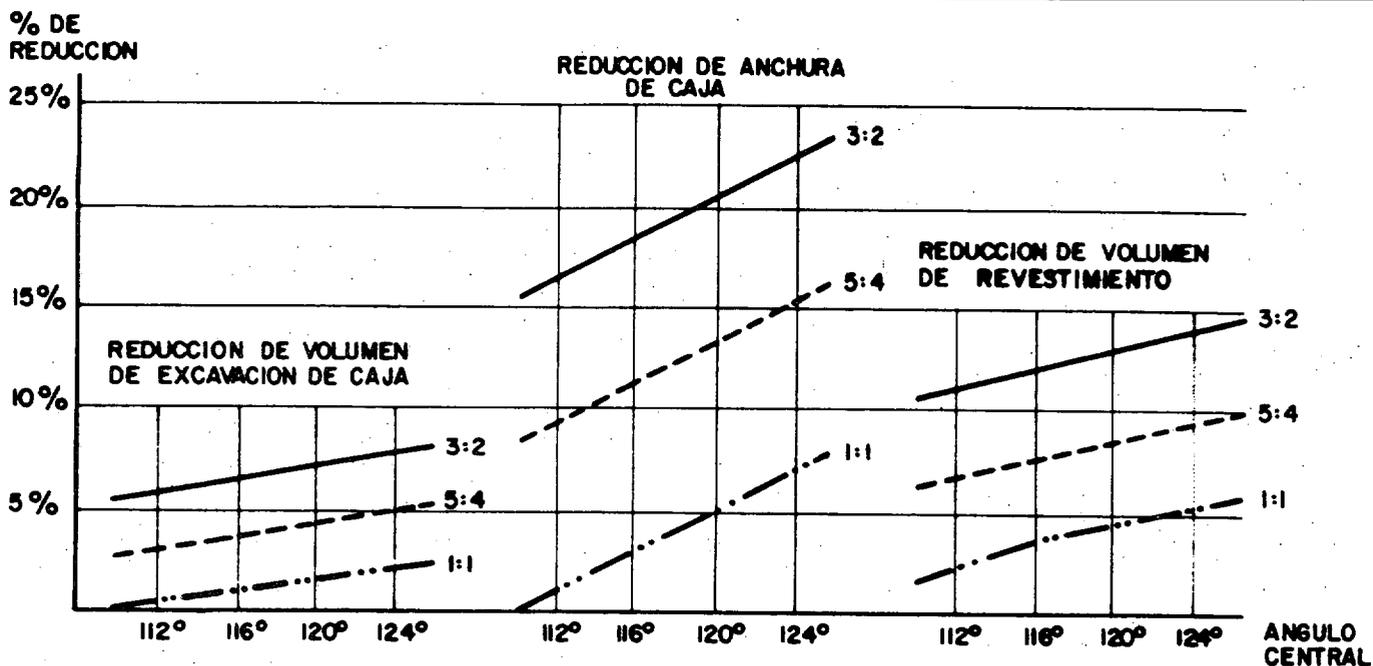
Donde parece haber una mayor ventaja de la sección circular es en la anchura del cauce revestido, que permitirá reducir la franja de expropiación, así como los volúmenes de excavación en trincheras y de terraplenes; pero el porcentaje de reducción no es el señalado en el gráfico, que está referido exclusivamente a la caja, mientras que la banda de terreno a expropiar incluye, además, banquetas, camino de servicio, arcenes, cunetas, faldas de terraplenes y de desmontes, con sus bermas, lo que supone duplicar o triplicar la anchura estricta del canal.

Por otra parte, a cota de rasante de la explanación, el contacto de las tierras con el revestimiento tiene pendientes de 1:1,83 a 1:2,45 en los canales circulares, frente a los tendidos de los trapeciales. Parece aconsejable, por ello, dar mayor anchura a las banquetas horizontales de

### CANALES CIRCULARES Y TRAPECIALES DE IGUAL CAPACIDAD Y CALADO

3. (Sección completa, con resguardo 15% del calado y revestimiento  $e = 6\%$ )

ARCO CIRCULAR	TALUD TRAPECIAL	SECCION TRAPECIAL SECCION CIRCULAR	ANCHO TRAPECIAL ANCHO CIRCULAR	REVESTIMIENTO TRAPECIAL REVESTIMIENTO CIRCULAR
112°	1:1	1,0032	1,0099	1,0270
116°	1:1	1,0100	1,0315	1,0379
120°	1:1	1,0166	1,0535	1,0478
124°	1:1	1,0230	1,0761	1,0573
112°	5:4	1,0309	1,1036	1,0725
116°	5:4	1,0385	1,1291	1,0845
120°	5:4	1,0459	1,1552	1,0955
124°	5:4	1,0531	1,1819	1,1061
112°	3:2	1,0617	1,1996	1,1271
116°	3:2	1,0702	1,2291	1,1405
120°	3:2	1,0785	1,2583	1,1529
124°	3:2	1,0867	1,2901	1,1647



REDUCCION DE SECCION, ANCHURA Y REVESTIMIENTO DE CANALES CIRCULARES CON RESPECTO A LOS TRAPECIALES DE IGUAL CAPACIDAD Y CALADO.

Gráfico 2

las secciones circulares, disminuyendo así una parte de la ventaja señalada.

### 7. TUBERIAS Y GALERIAS A LAMINA LIBRE

Para concluir estas notas sobre conducciones sin carga, se ofrece una tabla para el cálculo rápido de tuberías a lámina libre, con radio geométrico  $r$  y rugosidades comprendidas entre  $K_s = 0,05$  mm y  $K_s = 3$  mm. El cálculo de los coeficientes se ha efectuado con la fórmula (2), en la que se han utilizado los parámetros

$$K = 31,5 - 8,5 \log K_s$$

$$\alpha = 0,5 + \log \frac{4,57 - \log K_s}{3,57 - \log K_s} \quad (K_s \geq 0,5) \quad (12)$$

$$y = 0,5$$

propuestos por el autor en la publicación antes citada, siendo  $K_s$  la rugosidad equivalente de arena expresada en milímetros. Los parámetros que corresponden a pequeñas rugosidades del revestimiento ( $K_s < 0,5$  mm) se han obtenido expresamente para homogeneizar esta tabla. Son más exactos los que figuran en la publicación

señalada, en cuyas fórmulas se modifica el exponente de la pendiente del conducto.

El caudal llamado "estable" ( $Q_{EST}$ ) es igual al de la tubería llena y no debe ser alcanzado en circulación libre para evitar que se produzcan fenómenos de inestabilidad del flujo, creando posibles cierres y bolsas de aire en el conducto. Se obtiene a partir de la igualdad.

$$2 \pi \gamma^\alpha = (\gamma - \text{sen } \gamma)^{\alpha+1} \quad (13)$$

El caudal máximo  $Q_{MAX}$ , está claramente del lado de la inestabilidad, puesto que es superior al anterior, en porcentajes que van desde 6,24% a 6,86%. Se deduce mediante la expresión:

$$\gamma = \frac{\alpha \text{ sen } \gamma}{(\alpha + 1) \cos \gamma - 1} \quad (14)$$

La velocidad máxima de la circulación está siempre en la zona de calado estable, y es un 12% a un 13% superior a la velocidad a tubo lleno. El ángulo  $\gamma$  correspondiente es

$$\gamma = \text{tg } \gamma = 4,4934 \text{ rad} \quad (15)$$

Si se calcula con la fórmula de Manning (sin

4. TUBERIAS Y GALERIAS CIRCULARES EN REGIMEN DE LAMINA LIBRE

RUGOSIDAD (mm)	$\alpha$	$Q_{EST} = C_E \times r^{(2+\alpha)} \times \sqrt{i}$				$Q_{MAX} = C_M \times r^{(2+\alpha)} \times \sqrt{i}$			$V_{MAX} = V_Q r^\alpha \sqrt{i}$
		K	$\gamma$ (rad)	h/2r	$C_E$	$\gamma$ (rad)	h/2r	$C_M$	$V_Q$
0,05	0,581	40,3	4,6139	0,8357	189,4	5,3263	0,9439	201,2	67,584
0,10	0,586	38,8	4,6088	0,8348	183,0	5,3234	0,9435	194,5	65,349
0,25	0,593	36,3	4,6010	0,8333	172,0	5,3190	0,9430	183,1	61,541
0,50	0,600	34,0	4,5943	0,8321	161,9	5,3152	0,9426	172,5	57,975
0,75	0,604	32,6	4,5900	0,8313	155,7	5,3128	0,9423	165,9	55,800
1,00	0,607	31,5	4,5867	0,8306	150,7	5,3109	0,9421	160,8	54,070
1,5	0,612	30,0	4,5818	0,8297	144,0	5,3081	0,9417	153,7	51,720
2,0	0,616	28,9	4,5779	0,8290	139,2	5,3059	0,9415	148,6	49,991
2,5	0,619	28,1	4,5748	0,8284	135,6	5,3042	0,9413	144,8	48,741
3,0	0,622	27,4	4,5721	0,8279	132,4	5,3027	0,9411	141,5	47,639
Manning	0,6667	Variable	4,5287	0,8196	—	5,2781	0,9382	—	—

olvidar que el coeficiente n de esta fórmula es variable con el radio del tubo), resulta

$$Q_{EST} = \frac{1,9791}{n} r^{8/3} i^{0,5} \text{ que corresponde a } r = 4,5287 \text{ rad.}$$

$$Q_{MAX} = \frac{2,1289}{n} r^{8/3} i^{0,5} \text{ con ángulo central } r = 5,2781 \text{ rad.}$$

$$V_{MAX} = \frac{0,7182}{n} r^{2/3} i^{0,5} \text{ siendo } r = 4,4934, \text{ como anteriormente.}$$

8. ADECUACION DEL COEFICIENTE DE MANNING A LAS CARACTERISTICAS DEL CONDUCTO

Parece oportuno insistir en que el coeficiente n de Manning, impropriamente llamado "de rugosidad" en algunas publicaciones e incluso en tratados de Hidráulica, no sólo depende de las asperezas del cauce, sino también de sus dimensiones. Se estima que n se incrementa en una milésima cuando el radio de una conducción se multiplica por 3,5 aproximadamente; es decir, que si se atribuye a un tubo de 400 mm de diámetro el coeficiente 0,011, habrá que calcular con n = 0,012 la tubería de 1,40 m de diámetro, y la de 5 m con n = 0,013. Para poder aplicar a esta última el parámetro de la menor, su rugosidad tendría que ser 1/20 de la supuesta para la primera.

En el Gráfico n.º 3 se señalan unos valores orientativos de los coeficientes de Manning o

Strickler (1/n) adecuados a las dimensiones de la estructura hidráulica en estudio, con la finalidad de que no se traten los revestimientos de hormigón como si fueran de cristal, que es lo que sucede cuando se emplea n = 0,011 en el cálculo de galerías de presión o de acueductos de secciones grandes. Las curvas y franjas de variación de los coeficientes se han trazado, en los casos de galerías y tuberías, en función del diámetro. Para canales y acueductos, la relación se establece con la raíz cuadrada de la sección; en estos últimos solamente se han marcado las curvas medias, para evitar superposiciones de las bandas de aplicación.

Es curioso lo que ocurre con la fórmula de Manning, sin duda la más conocida y utilizada desde que fue propuesta, hace exactamente un siglo. En primer lugar, parece ser que el verdadero autor de la fórmula fue Gaukler, que la estableció en 1867. Para ambos "coautores", la expresión

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2} \tag{16}$$

sólo era válida en el caso de corrientes naturales, encauzamientos o canales, incluyendo los de solera no revestida; es decir, para conducciones de muy heterogéneas asperezas de fondo y cajeros.

A partir de 1910, se empezó a utilizar la expresión (16) para calcular tuberías, en las que la rugosidad es, prácticamente, uniforme y muy inferior, en general, a la de los cauces para los

ADECUACION DEL COEFICIENTE DE MANNING A LAS CARACTERISTICAS DE LA OBRA HIDRAULICA.

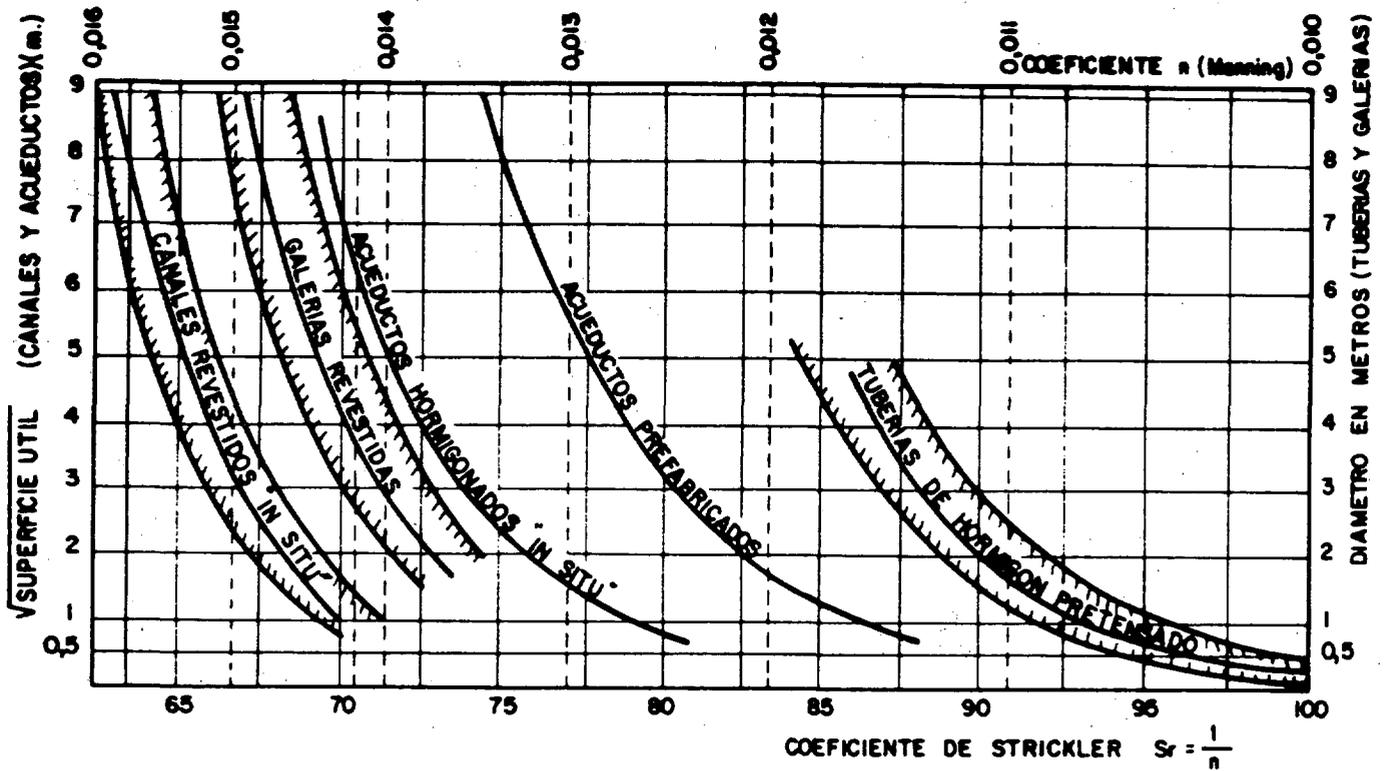


Gráfico 3

que se estudió. Pero no por ello se cuestiona la ambivalencia de la fórmula, en tanto que se llega a poner en duda si es adecuado aplicar a los regímenes de lámina libre los cálculos racionales de Kármán, Prandtl, etc., que están basados en profundos análisis hidráulicos de conductos cerrados.

Este tratamiento desigual (e injusto) entre unas y otras fórmulas, quizá, en otros tiempos, estuviera abonado por la sencillez de la expresión (16) y su fácil memorización, frente a las complejas operaciones que exigen las racionales de Colebrook y White; pero seguir hoy la línea de mínimo esfuerzo cuando los cálculos se realizan con calculadoras programables o con ordenadores, parece un contrasentido.

9. RESUMEN Y CONCLUSION

El contenido de estas notas permite pocas conclusiones. Se ha pretendido desmitificar el concepto de "radio hidráulico óptimo", que, en opinión del autor, tiene muy escaso peso frente a

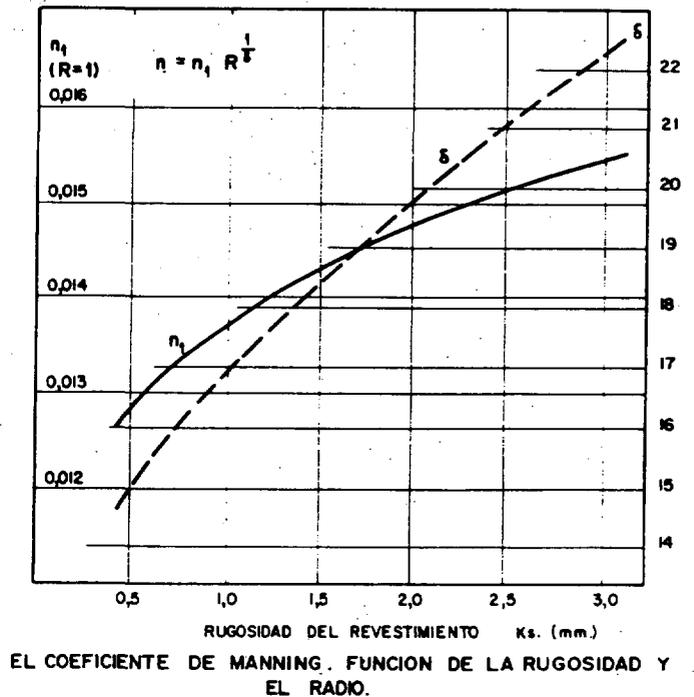
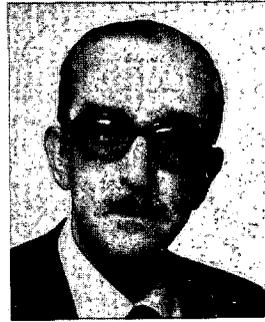


Gráfico 4

otros aspectos técnicos y económicos de los canales, tanto desde el punto de vista de su construcción, como de la explotación y conservación de estas obras. Se han dado fórmulas y ábacos para facilitar la comparación entre unos y otros tipos de perfil transversal de las conducciones, sin olvidar la sección circular completa, en régimen de lámina libre, que sólo se utiliza en raras ocasiones. Por último, ante la contumacia de muchos proyectistas en emplear exclusivamente la fórmula de Manning para el cálculo hidráulico de conducciones, se han ofrecido unos gráficos — entre los que está el Gráfico n.º 4 donde se representa la relación entre la rugosidad y el coeficiente de Manning—, que permiten evaluar el coeficiente  $n$  de esta fórmula, adecuándolo a las características y dimensiones de la estructura en estudio, tratando de evitar, con ello, que sigan apareciendo proyectos con revestimientos de hormigón lisos como espejos.

**Luis Torrent Rodríguez**



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, promoción 1950, es actualmente jefe del Area de Explotación de la Dirección General de Obras Hidráulicas.

Ha colaborado en numerosos proyectos hidroeléctricos del INI (chimenea de San Sebastián, presa de Pías, diques de Cubillos, embalse de Aumedrá, saltos del Cinca, central de Grado I, etc.

En el MOPU desde 1965, intervino en el proyecto de abastecimiento a Madrid por bombeo desde el Alberche (A.M.S.O.) y dirigió las obras de la elevación reversible de Altomira (Trasvase Tajo-Segura). Ha colaborado también en algunos proyectos para el extranjero (Valdesia, R. Dominicana; Acueducto de Santa Elena, Ecuador).

Asiduo colaborador de esta Revista, sus publicaciones versan sobre hidráulica de conducciones, chimeneas de equilibrio, instalaciones de bombeo, etc., con esporádicas incursiones de «divertimento» en otros campos.

