

Diseño hidráulico de conductos de saneamiento urbano (*)

Por RAMON VAZQUEZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ayuntamiento de Barcelona

Se presenta a discusión este tema del diseño hidráulico de conductos de saneamiento, sobre el cual no hay uniformidad de criterio, con la intención de buscar justificación a una formulación práctica de todos conocida: La fórmula de Manning. Lo desarrollado a continuación está expuesto a la crítica de los matemáticos hidráulicos y quizá al favor de los hidráulicos prácticos. Sea en provecho de los «hidráulicos» todos la discusión.

1. REFERENCIAS TEORICAS

Weisbach (Brunswick, 1845) y Darcy (París, 1857) establecen una relación racional entre la pérdida de carga en un conducto y la velocidad, la cual se formula actualmente como:

$$J_r = \lambda \cdot \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g}$$

$D = 4R$; R = radio hidráulico

conocida como fórmula de Weisbach.

El parámetro λ o fricción depende del tipo de flujo (laminar o turbulento) y de la rugosidad de las paredes de la conducción, en general.

Para determinar en qué tipo de flujo nos encontramos, averiguamos el número de Reynolds, Re

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

V = velocidad media.

ν = viscosidad cinemática = $1.25 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
para agua a 12° C .

Si $Re < 2320$ estamos en flujo laminar.

Si $Re > 2320$ estamos en la zona de transición o en la zona turbulenta.

En el caso de flujo laminar, tanto teórica como experimentalmente se comprueba la depen-

dencia de la fricción únicamente del número de Reynolds. Como veremos, nuestro dominio de actuación no es el del flujo laminar, y por tanto pasamos al caso de flujo turbulento.

En el caso de flujo turbulento, la fricción dependerá de la rugosidad de las paredes según el número de Reynolds, existiendo flujos turbulentos lisos que son aquellos en que la fricción depende exclusivamente del número de Reynolds (pero por expresión distinta a la de flujo laminar) y flujos turbulentos rugosos, que son aquellos en que la fricción depende exclusivamente de la rugosidad de las paredes. Entre ambos extremos existen flujos que dependen de ambos factores en mayor o menor medida según Re .

Los resultados experimentales de Nikuradse en 1930 para conducciones lisas y rugosas, facilitaron la formulación de Prandtl y von Karman que establecieron las siguientes relaciones:

$$\text{Conducciones lisas} \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left(\frac{Re \sqrt{\lambda}}{2.51} \right)$$

$$\text{Conducciones rugosas} \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left(\frac{3.71 D}{K} \right)$$

K = rugosidad absoluta

Entre las dos condiciones extremas, completamente lisas o completamente rugosas, quedaba una zona de transición en la que los resultados experimentales de Nikuradse no coincidían con la práctica de los tubos comercializados.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de noviembre de 1985.

Colebrook y White (1939) desarrollaron la ley que se ajustaba a la práctica en esa zona.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{K}{3.71 D} \right)$$

Estas fórmulas desarrolladas en este párrafo son aplicables a conductos trabajando a sección llena, tanto circulares como de otras formas. Las velocidades deducibles por aplicación de la fórmula de Weisbach, son velocidades medias en la sección de flujo.

2. FORMULACION EMPIRICA DE FLUJO EN CANALES

Ante la imposibilidad de utilizar una fórmula semiteórica como la de Weisbach para el cálculo de canales a cielo abierto, en la ausencia de información precisa sobre la rugosidad basada en la expresión que sintetizó A. Brahms en 1754 y que Antoine de Chezy, profesor y director de la Ecole des Ponts et Chaussées de París, difundió en 1775.

$$V = C \sqrt{RJr}$$

C = Coeficiente de rugosidad o rozamiento.

que tiene la misma relevancia para cálculo en canales que la de Weisbach para cálculo en tuberías.

Distintas aproximaciones de C producen diferentes versiones prácticas.

Los ingenieros suizos Ganguillet y Kutter propusieron en 1867

$$C = \frac{100 \sqrt{R}}{b + \sqrt{R}}$$

b = b (rugosidad)

que ha sido bastante usada. No obstante la de más popularidad es la propuesta por Gauckler (Francia, 1868), relanzada por Robert Manning (Irlanda, 1890) y aprovechada por Strickler (Suiza, 1924).

En virtud de ello hay siete denominaciones posibles de la fórmula, de las cuales adoptamos

la más conocida: fórmula de Manning.

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

n = coeficiente de rozamiento

La velocidad, en función del coeficiente de rozamiento, será.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2}$$

3. DISCUSION

3.1. Dominio de funcionamiento hidráulico

Existen diagramas generales de rozamiento para hallar $\lambda = \lambda(Re, K)$ como el de Hunter Rouse o el más conocido de Moody.

Vamos a intentar deducir con unas premisas muy generales en qué zona del ábaco nos movemos.

- i: Velocidad máxima de 5 m/s por razones de durabilidad.
- ii: Velocidad mínima de 0,6 m/s por razones de autolimpieza.
- iii: Diámetros variables de tubo entre 0,4 m y 3,0 m.

Con lo que el número de Reynolds queda acotado

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \begin{cases} \frac{0.4 \times 0.6}{1.25 \times 10^{-6}} = 1.92 \times 10^5 \text{ mínimo} \\ \frac{5 \times 3}{1.25 \times 10^{-6}} = 1.2 \times 10^7 \text{ máximo} \end{cases}$$

$$\text{luego } 1.92 \times 10^5 < Re < 1.2 \times 10^7$$

Por otro lado supongamos que la rugosidad absoluta varía entre 0,4 mm y 1,5 mm; 0,4 será la mínima para tubos muy lisos, bien instalados y acabados, que por lo general serán aquellos de diámetro máximo 0,8 m. Diámetros mayores suelen ser ya de hormigón y presentar peores acabados y juntas, etc., con lo que K puede aumentar a 1,5 mm. También pueden

darse tubos de pequeño diámetro muy rugosos y con malos acabados con $K = 1,5$ milímetros.

Resumiendo:

a) Tubos pequeños rugosos:

$$\frac{D}{K} = \frac{0.40}{0.0015} = 270$$

b) Máximos tubos pequeños lisos:

$$\frac{D}{K} = \frac{0.80}{0.0004} = 2000$$

c) Grandes tubos de hormigón:

$$\frac{D}{K} = \frac{3.0}{0.0015} = 2000$$

El lector puede hacer otras suposiciones de acuerdo a su experiencia y llevar de aquí en adelante el desarrollo con sus valores particulares.

En cualquier caso, nos movemos aproximadamente entre las curvas correspondientes a:

$$\frac{D}{K} = 300 \text{ y } \frac{D}{K} = 2000$$

En el ábaco de Moody adjunto se define el dominio de trabajo. Se puede ver que la zona en que λ es independiente de Re ocupa un 67 por 100, siendo la restante una zona en la que efectivamente aparece una curvatura (Colebrook-White) pero que no hace que la función se separe mucho de los valores constantes de la rama recta. Se hace en este punto una tímida sugerencia de considerar el rozamiento función de la rugosidad e independiente de Re , que es en cierta medida la idea subyacente en el grupo de fórmulas de Chézy.

3.2. Singularidades a tener en cuenta

3.2.1. Rugosidad

Las recomendaciones de la hoja de trabajo de la Abwasser Technische Vereinigung establecen

una rugosidad que no es la rugosidad absoluta de las paredes, K , sino una rugosidad que denominan de régimen, K_b , la cual engloba el efecto de diferentes influencias como juntas, entradas laterales, sedimentos, pozos de registro, tramos curvos, etc. Esa es la rugosidad que hemos considerado en la delimitación de la zona de trabajo.

De todos es conocida la importancia capital de la estimación de esa rugosidad, y la probabilidad de cometer error al estimarla. Tanto en unas fórmulas como en otras, ese error va a existir.

Vamos a comparar la sensibilidad a un error en la estimación de la fricción o rozamiento en dos fórmulas bien distintas: una muy precisa (Colebrook-White) y otra muy grosera (Manning).

Manning:

$$dv = R^{2/3} J r^{1/2} \left(-\frac{1}{n^2} \right) dn$$

Colebrook-White (supuesto: flujo turbulento rugoso):

$$v = \sqrt{2gDJr} \left[-2 \log \left(\frac{K}{3.71D} \right) \right]$$

$$dv = \sqrt{2gDJr} \cdot (-2) \cdot \frac{1}{\left(\frac{K}{3.71D} \right) \ln 10} \cdot \frac{1}{3.71D} \cdot dK$$

Pasemos a comprobar la sensibilidad:

Manning:

$$\frac{dv}{v} = \frac{-\frac{1}{n^2} dn}{\frac{1}{n}} = -\frac{1}{n} \frac{dn}{n}$$

Colebrook-White (en realidad Prandtl-von Karman):

$$\frac{dv}{v} = \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\log \left(\frac{K}{3.71D} \right)} \cdot dK$$

Si suponemos que estamos en condiciones de $n = 0,013$ o $K_b = 1,5$ mm, tendremos:

Manning:

$$\frac{dv}{v} = -75 \, dn$$

Colebrook-White:

$$\frac{dv}{v} \text{ depende de } \frac{D}{K} (300 \div 2000) \left\{ \begin{array}{l} \frac{dv}{v} = -41 \, dK \\ \frac{dv}{v} = -32 \, dK \end{array} \right.$$

La duda de elección típica en n es de 1 milésima, lo que comportaría errores del 7,5 por 100 por ejemplo, si en lugar de $n = 0,013$, tomamos $n = 0,014$, linealizando podemos decir que hemos subestimado la velocidad en un 7,5 por 100.

En la estimación de K_b , con una buena referencia de valores para elegir, se pueden cometer errores de 3 a 5 diezmilésimas.

La ATV en su hoja de trabajo, distingue valores con saltos de 5 diezmilésimas. Para esos saltos el error en la estimación de la velocidad puede ser de un 2 por 100 aproximadamente.

Por ejemplo, si elegimos entre $K_b = 1,5$ mm y $K_b = 1$ mm, el error al tomar equivocadamente el menor, supone una sobreestimación de la velocidad en un 2 por 100.

Se deduce, pues, una sensibilidad mayor en el modelo de Manning, y por tanto una menor seguridad ante errores estimativos. Para visualizar estas propiedades se adjunta un gráfico comparativo de capacidades de desagüe, vs. diámetros, calculados según diferentes fórmulas y elaborado por Kiefer.

3.2.2. Llenado parcial

Normalmente los conductos de saneamiento se calculan para llenado total o casi total (sistemas unitarios), y de hecho las fórmulas de Prandtl-von Karman y White-Colebrook se diseñan para condiciones de llenado total de la sección y trabajo en carga, siendo J_r la pendiente de la línea de energía.

Por contra las fórmulas expresadas en el pa-

rágrafo 2 surgen del estudio empírico de caudales en canales, lo cual se aproxima más al estado de funcionamiento habitual de las redes de saneamiento que entran en carga cada período de retorno, y por lo general funcionarán con llenado parcial y régimen de funcionamiento de canal abierto.

Los estudios de Thormann (1944) demuestran que la influencia del diámetro, la pendiente y la rugosidad en las curvas de llenado (curvas que relacionan propiedades hidráulicas con el calado) son inferiores a las del rozamiento del aire con la lámina libre y las burbujas incluidas en el agua fluyente, a partir de calados que superan la mitad del diámetro hidráulico (cuatro veces el radio hidráulico = diámetro hidráulico). Volkart (1978) analiza en detalle el tema y basándose en el estudio del número adimensional de Boussinesq (Bou_w) que es un número de Froude en que la dimensión característica escogida es el radio hidráulico, llega a la conclusión de que a partir de $Bou = 6$ comienza la influencia del aire. En la práctica ello implica inclinaciones del 14 por 100 para tubos de 0,5 m de diámetro o del 9 por 100 para tubos de 1,5 m.

Aunque tales estudios no han cristalizado en fórmulas aceptadas universalmente en la práctica ingenieril, hay que tener presente la existencia de esas influencias y otras como el hecho de que a medida que va llenándose la sección hay una variación de sección de flujo, de rozamiento en paredes y de radio hidráulico.

De hecho se ha llegado a admitir que existe la siguiente relación entre el coeficiente de fricción correspondiente a llenado parcial y total siguiente:

$$\sqrt{\frac{\lambda_v}{\lambda_T}} = \left(\frac{R_T}{R_v} \right)^{0.125}$$

subíndice v = parcial

subíndice T = total

$\lambda \equiv$ fricción

$P \equiv$ radio hidráulico

y en el caso de que el calado supere media sección (para tubos), debe calcularse el radio hidráulico de acuerdo a una sección ficticia

4. CONCLUSION

Se aconseja el empleo de la fórmula de Manning por las siguientes razones:

- Su dominio de aplicación usual (canales) coincide más específicamente con el caso de las conducciones de alcantarillado, en que el flujo se puede clasificar del tipo de canal abierto.
- Existe mucha más experiencia práctica en su aplicación y en la estimación del factor de rugosidad que en otras fórmulas (Scobey, Kutter, Scimemi).
- Su aplicación es sencilla y mnemotécnicamente fácil de recordar su formulación. Colebrook-White es difícil de recordar, lenta de manipulación. Además Manning ofrece directamente el caudal para llenado total y la aplicación de un ábaco de «elementos hidráulicos de la sección» para deducir según las curvas de llenado la velocidad o el caudal para el calado previsto.

Desde luego que el camino inverso, es decir, dado un caudal deducir el diámetro necesario, se complica bastante con la fórmula de Colebrook y el uso de los «elementos hidráulicos», siendo más expeditivo el uso de Manning.

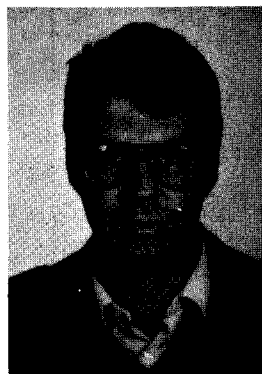
- Si a A,B y C añadimos que los resultados no difieren de una manera preocupante con coeficientes de rugosidad bien elegidos, de los conseguidos con formulaciones más precisas, parece oportuno el emplear universalmente para conducciones de saneamiento la fórmula de Manning.

BIBLIOGRAFIA

- W. KIEFER: «Points de vue Hydrauliques et statiques choisis pour la planification et la construction d'égouts» CEBEDOC. Janvier 1972.
- Abwassertechnische Vereinigung/kuratorium für Kultur bauwesen: Arbeitsblatt A 110, Richtlinien für die hydraulische Berechnung von Abwasserkanälen. Vertrieb: ZfGW-Verlag GmbH, Frankfurt, 1965.

- L. TORRENT: «Fórmulas hidráulicas de conducciones» Revista de Obras Públicas, agosto 1983. pp. a 584.
- ASCE & WPCF: (American Society of Civil Engineers and the Water Pollution Control Federation). «Design and construction of sanitary and storm sewers». 1969.
- METCALF & EDDY: «Collection and pumping of wastewater». McGraw-Hill. 1981
- J. B. WHITE: «The design of sewers and sewage treatment works» Eward Arnold (Publishers) Ltd. 1970.
- VEN TE CHOW: «Hidráulica de los caudales abiertos» Editorial Diana (Mexico) 1982.
- AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION: «Concrete Pipe Handbook» 1967.
- BREBBIA, FERRANTE: «Computational Hydraulics». Butterworths. 1983.
- VOLKART: «Hydraulische Bemessung teilgefüllter Steilleitungen». Gas, Wasser, Abwasser. 58 Jahrgang 1978 Nr. 11 pp. 658 a 667.
- JAEGER: «Technische Hydraulik». Birkhäuser Verlag (Basel) 1949.
- FAIR, GEYER, OKUN: «Water and Wastewater Engineering» Vol. 1 John Wiley and Sons, Inc. New York, 1958.

Ramón Vázquez



Ingeniero de Caminos por la Universitat Politècnica de Catalunya. Promoción 1979, número col. 6624.

Funcionario del Ajuntament de Barcelona desde 1981, como ingeniero de la Unitat Operativa de Clavegueram (Alcantarillado) del Area de Obras Públicas.

Jefe del Proyecto MIRAB (Modelo Informático de la Red de Alcantarillado de Barcelona) iniciado en 1984 y finalización prevista para 1985. Miembro de la IAHR (International Association for Hydraulics Research) y Coordinador para España de la ERIE (European Research Information Exchange for Urban Hydrology and Hydraulics). Colaborador con la AEAS (Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento) para la redacción del borrador «Norma para el diseño de redes de alcantarillado».