

Comentarios a la Instrucción para tubos de hormigón armado o pretensado (*)

Por **LUIS TORRENT**

Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.

La "Instrucción del Instituto Eduardo Torroja para tubos de hormigón armado o pretensado", publicada en junio de 1980, propone, en su capítulo V, unos criterios hidráulicos de dimensionamiento de las conducciones que creemos merecen ser analizados con cierto detenimiento. Nuestra experiencia y afición a la hidráulica de conducciones nos ha movido a escribir estos comentarios que, en gran parte, discrepan de las hipótesis de cálculo sustentadas en el citado documento.

1. VELOCIDAD MAXIMA ADMISIBLE

Antes de pasar al tema principal de estas notas, queremos hacer unas muy breves observaciones a la limitación de velocidad del flujo que se preconiza para los tubos de hormigón.

El artículo 34, señala, por una parte, la posibilidad de sobrepresiones importantes por golpe de ariete cuando las velocidades del agua son superiores a 2 m/s.; por otra, recomienda no rebasar los 3 m/s. para evitar el ataque físico del hormigón por erosión. En el «comentario», se relaciona esta erosión con el carácter incrustante del agua: a mayor poder incrustante, mayor velocidad admisible. Es un criterio un tanto opinable; pero estamos de acuerdo en que la velocidad no sea, en general, superior a 3 m/s. En cuanto a las sobrepresiones por golpe de ariete, creemos que su efecto puede ser circunscrito, casi siempre, con un adecuado diseño, a reducidos tramos de tubería, mediante la instalación de chimeneas de equilibrio, válvulas o calderines que protejan la mayor parte del trazado de conducción, que queda así trabajando como un sifón. Más importantes pueden ser, en estos casos, los problemas de aireación y purga, de puntos altos, pendientes límites, etcétera.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de marzo de 1984.

2. PERDIDA DE CARGA (Art. 35)

La «Instrucción» acepta que las tuberías de hormigón se calculen hidráulicamente mediante la fórmula de Colebrook, también llamada fórmula universal de tubos, y recomienda adoptar valores de la rugosidad de la conducción «no inferiores a 0,5 mm. (normalmente, no superiores a 1 mm.)», siendo así que el valor de dicha rugosidad de los tubos de hormigón «normalmente oscila entre 0,03 y 0,10 mm.». La mayorización de la rugosidad se pretende justificar por una «serie de circunstancias aleatorias (errores de alineación, juntas, etc.) e independientes del material de la tubería».

2.1. Es indudable que el proyectista de una conducción debe tener en cuenta las pérdidas de carga en las juntas, en los cambios de alineación, tanto verticales como horizontales, en piezas especiales (bifurcaciones; registros, etc.); pero entre el cálculo pormenorizado de estas pérdidas y el «café para todos» que supone englobarlas en un coeficiente de rugosidad 33 veces superior al del material, hay una notable diferencia. Una diferencia que, además, no está calibrada, y deja al proyectista en duda sobre cuál es el margen de seguridad que está utilizando, pues puede variar bastante de unos a otros casos.

Veamos un ejemplo:

Por un tubo de diámetro 0,50 m. circula el

COMENTARIOS A LA INSTRUCCION PARA TUBOS DE HORMIGON ARMADO O PRETENSADO

agua a 3 m/s.; en otro, de 3 m. de diámetro, la velocidad es de 1,5 m/s. Ambos tubos tienen una rugosidad $K = 0,1$ mm. El proyectista, ateniéndose a la «Instrucción», calcula con $K = 0,75$ mm. (no inferior a 0,5 ni superior a 1 mm.).

La pérdida de carga de la primera tubería resulta 47,4 % mayor que la que corresponde a la aspereza interna del material; la de la segunda, sólo queda incrementada en 35,4 % y, sin embargo, el número de juntas será probablemente, el doble en tubería grande que en la pequeña, por condicionamientos de peso y manejabilidad de los tubos.

2.2. Al aplicar coeficientes correctores a la rugosidad de una conducción, se introduce en el cálculo una nueva variación indeterminada, que depende no sólo del diámetro y la velocidad, como acabamos de ver, sino también de la aspereza propia del material que reviste la tubería. Multiplicar por 10 esa aspereza, no proporciona el mismo margen si la propia del tubo es 0,025 o 0,1 mm., como se puede apreciar en los gráficos 1 y 2. Así, para $d = 1$ m., al multiplicar por 10 la rugosidad del amianto-cemento se incrementan las pérdidas en un porcentaje que fluctúa entre el 25 y el 33 %; mientras que pasar de 0,1 mm. a 1 mm. supone un aumento del 48 al 56 % de la pendiente piezométrica.

La «mayoración de la rugosidad» creemos es un criterio francamente erróneo; tampoco es excesivamente correcto el mayorar las pendientes piezométricas para tener en cuenta otras circunstancias, en lugar de evaluar estas circunstancias cuando pueden ser conocidas; pero, al fin y al cabo, es una práctica más habitual, menos incierta y más equitativa.

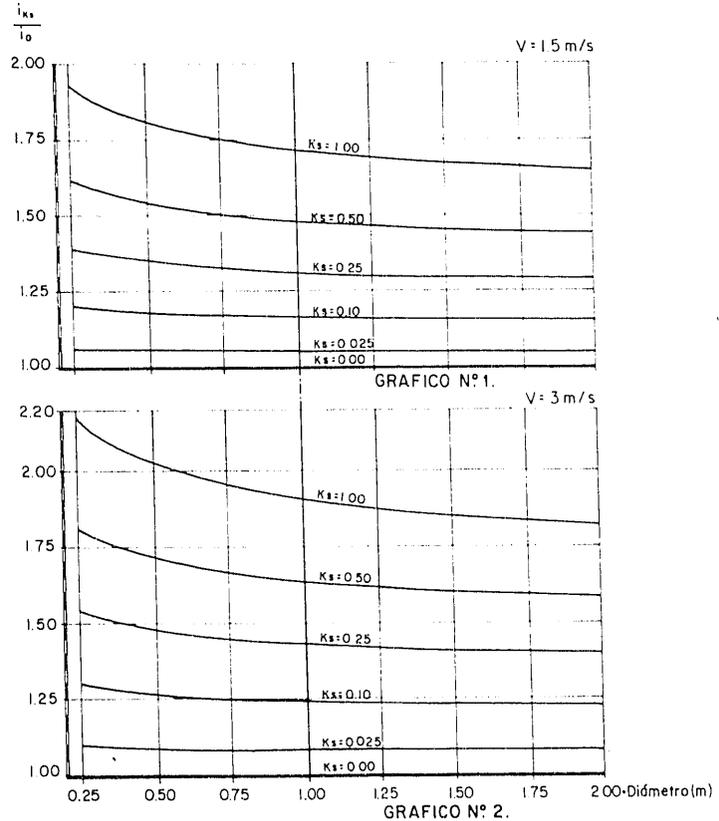
2.3. Las pérdidas de carga singulares (codos, estrechamientos, válvulas, juntas, etc.) se suelen calcular en función de la energía cinética del agua y añadir al desnivel piezométrico del tubo.

$$\text{Pérdida total de carga} = L \times i + C \frac{V^2}{2g}$$

Según la «Instrucción», estas pérdidas en tuberías de hormigón, estarían comprendidas entre

$$L \times i_{0,5} \text{ y } L \times i_{1,0}$$

PERDIDA DE CARGA en tuberías de diversos tamaños y rugosidades referidas a la correspondiente al tubo liso.



Volviendo al ejemplo anterior, e igualando la pendiente piezométrica a $i_{0,75}$, resulta que la pérdida de carga por juntas, cambios de alineación, etc., de la tubería grande vale, por kilómetro de conducción,

$1,28 \frac{V^2}{2g}$, mientras que en la tubería pequeña la pérdida es de $13,9 \frac{V^2}{2g}$; es decir, 10 veces superior a la de

la tubería de 3 m. (que tal vez tenga doble número de juntas, como antes dijimos). Por otra parte, ¿qué clase de juntas se suponen en estos tubos para que se llegue a producir una caída del 10 al 15 % de la energía cinética, en cada una?

Vamos, de momento, a suponer correcta la evaluación de las pérdidas singulares de la tubería grande (o sea, $1,28 \frac{V^2}{2g}$ por km. de conducción). Para obtener esa misma cifra en la tubería menor, bastaría con incrementar en un

35 % la rugosidad del material (0,1 mm.), en lugar del 750 % de aumento medio que «aconseja» la «Instrucción».

2.4. Calcular con rugosidad hasta de 1 mm. las tuberías de hormigón centrifugado, cuyo interior brilla como un espejo, es equipararlas a un revestimiento de tunel hormigonado con encofrados poco cuidados. Es renunciar, de antemano, a todas las ventajas que puede suponer el empleo de los tubos de hormigón cuidadosamente ejecutados, a los que se está imponiendo una «gabela» técnica que difícilmente podrán superar en competencia con tubos de otros materiales, casi exentos, al parecer, de pérdidas de carga en juntas, de errores de alineación, etc. (puesto que se calculan con «su rugosidad» y sólo se incrementa la pendiente en un 5 %) (*).

Esta situación de inferioridad en que la «Instrucción» coloca a los tubos de hormigón, se ha visto últimamente agravada por una maniobra que queremos, desde aquí, poner de manifiesto: Alguna de las casas fabricantes de tuberías de «otros materiales» ha difundido unas anónimas tablas de cálculo de tubos de hormigón «con medio uso», atribuyéndoles una rugosidad de ¡5 mm.! La atribución parece excesivamente burda, pero es indudable que puede influir en la decisión de proyectistas más o menos inexpertos, por lo que vamos a hacer unas consideraciones sobre el particular.

Basándonos en los cálculos de Scobey, hemos correlacionado el incremento de la rugosidad en función del tiempo (t , en años) que parece obedecer a una expresión:

$$K_t = K_0 \cdot e^{0.05t} (**)$$

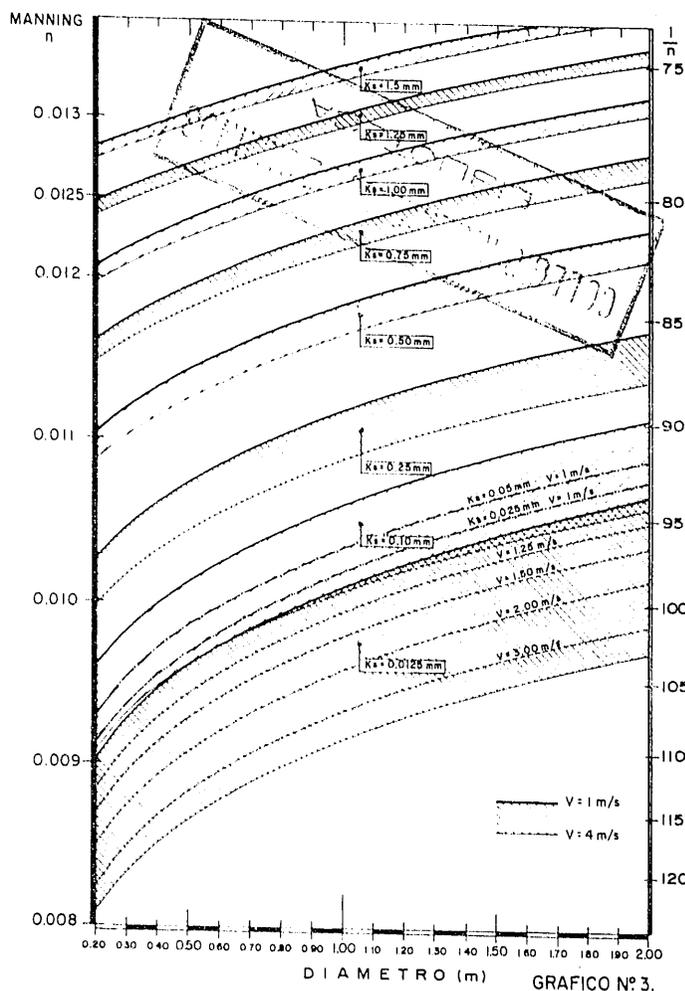
Según esta fórmula, para alcanzar $K_t = 5$, a partir de $K_0 = 0,1$ mm., se necesitan setenta y ocho años, que es un largo «medio uso» (la fórmula de envejecimiento también sería aplicable a los «otros materiales» que en el mismo plazo, alcanzarían una rugosidad 50 veces mayor que la inicial).

Para llegar a $K = 1$ mm., haría falta un período de utilización de cuarenta y seis años; pero la

(*) Manual General de Uralita, pág. 309, 1966.

(**) Fórmulas hidráulicas de conducciones, por L. T. Revista de Obras Públicas, septiembre 1983.

VARIACION DEL COEFICIENTE n DE MANNING EN FUNCION DEL DIAMETRO DEL TUBO, SU RUGOSIDAD Y LA VELOCIDAD DEL FLUJO DE AGUA.



«Instrucción» no atribuye a envejecimiento, del que no habla, la adopción de tan alta rugosidad.

3. FORMULAS DE CALCULO (Art. 35)

Llevamos muchos años trabajando, para que todas las tuberías se calculen con las fórmulas universales de tubos. Hemos empleado innumerables días en la preparación de ábacos y tablas para facilitar el acercamiento de los técnicos a las complicadas expresiones de Prandtl-Colebrook, como fórmula «patrón» de medida de hidraulicidades de tubos.

$$i = \frac{\lambda v^2}{2gd}$$

siendo

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log. \left(\frac{2,51 v}{vd} + \frac{K_s}{3.700d} \right)$$

Incluso hemos logrado deducir unas expresiones exponenciales del tipo $V = B d^{0.5}$, que se aproximan mucho a los resultados de Colebrook para cada rugosidad estudiada.

La «Instrucción», al aceptar el cálculo de tubos por la fórmula universal parecía haber dado un gran paso en nuestra misma dirección (Uralita lo ha dado también, al abandonar la fórmula de Scimemi, poco apta ya para los diámetros de tuberías de su ampliada gama de fabricación). Pero, al final del artículo 35 que comentamos, resurge Manning de sus cenizas y lo echa todo a perder. La «Instrucción», en sus «recomendaciones», dice que el coeficiente de la fórmula no sea inferior a 0,012 y, normalmente, no superior a 0,013, aunque admite que, si se justifica, se puede rebajar hasta 0,011.

¿Qué significa un coeficiente de Manning 0,012, que depende del diámetro e incluso de la velocidad? Puede representar una rugosidad de la conducción de 0,25 mm. ($d = 3,4$ m., $V = 1,5$ m/s.) o de 1 mm., si $d = 0,20$ m. y $V = 3$ m/s. Como se refleja en el gráfico adjunto, volver a introducir las fórmulas de Manning en la hidráulica de tubos puede dar lugar a la mayor de las confusiones.

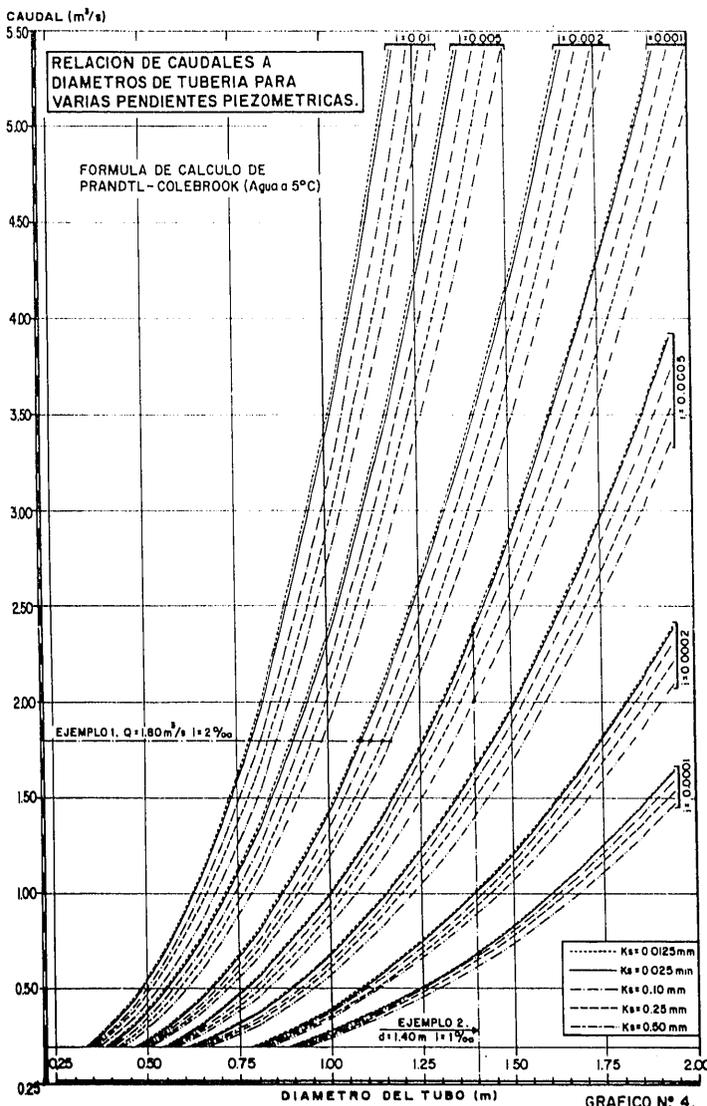
La tendencia natural de todo calculista de conducciones, no muy avezado en el tema y con urgencia de culminar su trabajo, será adoptar el término medio de los valores recomendados en la «Instrucción» para el cálculo y utilizar la sencilla fórmula de Manning, en vez de la engorrosa de Colebrook. De manera que van a salir muchos proyectos de tuberías de hormigón con pendientes piezométricas asombrosas (o no saldrán, porque, al comparar con hidraulicidades que no han sido gravadas por su «Instrucción», serán otros los materiales que se seleccionen para la conducción proyectada).

4. REPLANTEAMIENTO

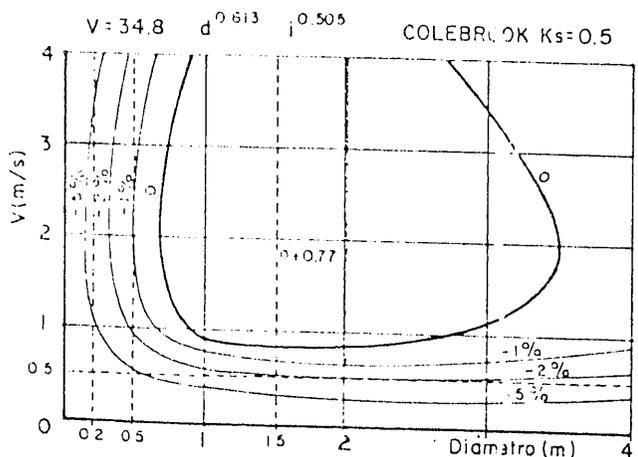
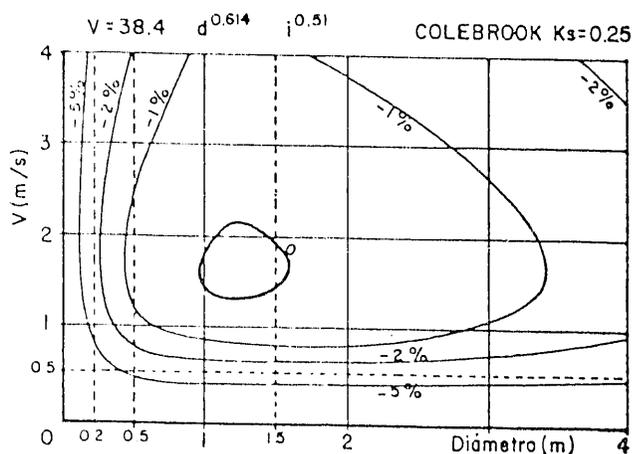
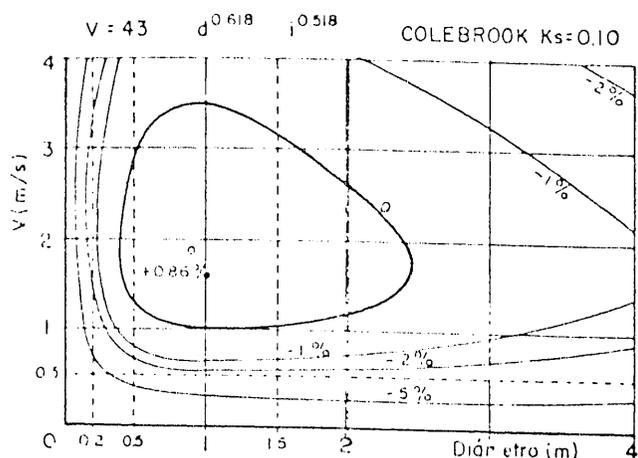
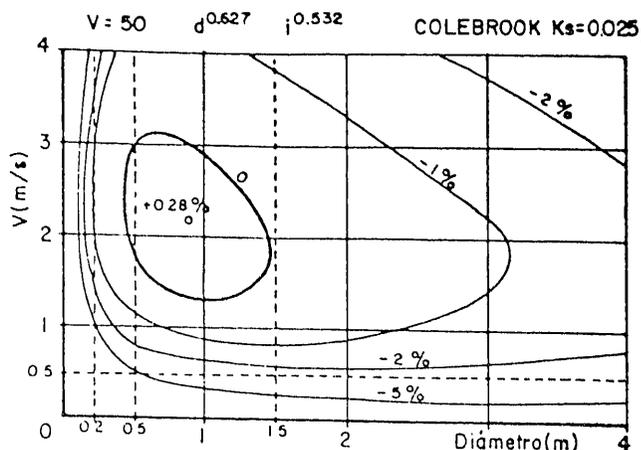
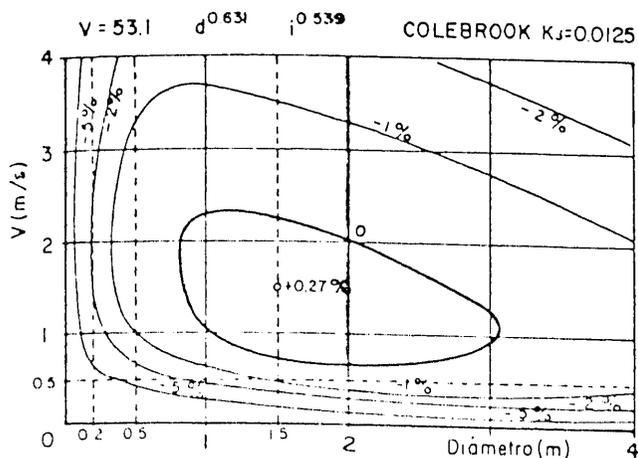
Sin embargo, es muy fácil llegar a establecer un contraste equitativo entre unas y otras opciones de tuberías, atendiendo a su rugosidad, exclusivamente; luego, en el Proyecto, se justificarán incrementos piezométricos por juntas, errores, clapetas, bifurcaciones o lo que sea, pero a partir de una comparación «desnuda». Porque, al fin al cabo, todas las conducciones tienen juntas, en todas se pueden cometer errores de alineación, todas ellas envejecen en función de la calidad de las aguas, etcétera.

La comparación sería, simplemente, la igualación de caudales y pendientes —que suelen ser datos del problema—, obteniendo de ella la relación de diámetros equivalentes en uno u otro material. De este contraste se deduciría una «evaluación económica de hidraulicidades», lo que no quiere decir una decisión final, en la que se deben ponderar otros factores que aquí no vamos a abordar.

4.1. Mediante el gráfico número 4 se pueden relacionar caudales y diámetros para diversas pendientes piezométricas. La comparación, que hemos llamado «desnuda», se obtendría



COMENTARIOS A LA INSTRUCCION PARA TUBOS DE HORMIGON ARMADO O PRETENSADO



COLINAS DE ERROR DE LAS FORMULAS
HIDRAULICAS PROPUESTAS, DEL
TIPO $V = B d^b i^c$, RESPECTO A LA
FORMULA DE COLEBROOK.
(Agua a 10°C. aproximadamente)

GRAFICO N° 5.

trazando la ordenada del caudal hasta encontrar el haz de curvas de la pendiente de que se dispone: las abscisas nos darán los diámetros necesarios, de acuerdo con la rugosidad del material.

Solamente hemos dibujado siete haces de curvas, correspondientes a pendientes comprendidas entre 0,0001 a 0,01, siendo necesario interpolar en el gráfico para pendientes no

trazadas. Pero lo más importante —en nuestra opinión— que se aprecia en la figura, es que la variación necesaria de diámetro entre rugosidades próximas para obtener igual caudal, es muy inferior a lo que se podría suponer.

4.2. También se puede utilizar, para comparar unas tuberías con otras, las fórmulas monomías antes citadas

$$V = B d^b i^c$$

cuyos resultados se aproximan mucho a los que resultan de la expresión de Colebrook, como queda patente en los gráficos de «colinas de errores que se insertan en la publicación ya mencionada.

Tanto los exponentes como el coeficiente de estas fórmulas están redondeados con cierta amplitud para cada rugosidad considerada, pues no puede pretenderse una exactitud milimétrica en fórmulas que, por ejemplo, no tienen en cuenta la variación de la viscosidad cinemática del agua con la temperatura, sino que se han establecido para agua a 10° C, aproximadamente. Por cierto, que el efecto de esta viscosidad es diferente de unos tubos a otros, siendo más acusado para los de menor rugosidad. Por ejemplo, para $K = 0,025$ mm., se produce un aumento de pérdida de carga del 2 al 3 % (varía también con la velocidad) cuando la temperatura del agua baja de 11° a 5°; para este mismo descenso de temperatura, la pérdida de carga en tuberías de $K_s = 0,25$ sólo aumenta entre 0,5 y 1,15 %.

Como es evidente, las fórmulas no pueden recoger estas pequeñas variaciones y de ahí el redondeo de los parámetros. Sin embargo, para comparar entre sí las rugosidades tendremos que acudir a las expresiones completas que nos sirvieron para calcular las fórmulas equivalentes a la de Colebrook (con $v = 1,3 \times 10^{-6}$ m²/s. y $K_s < 0,5$ mm.).

$$B = 29 + 4,96 \ln \frac{1,636}{K_s}$$

$$b = \frac{1}{1,636} + \frac{1}{1,150} \left(\ln \frac{1,636}{K_s} \right)^2$$

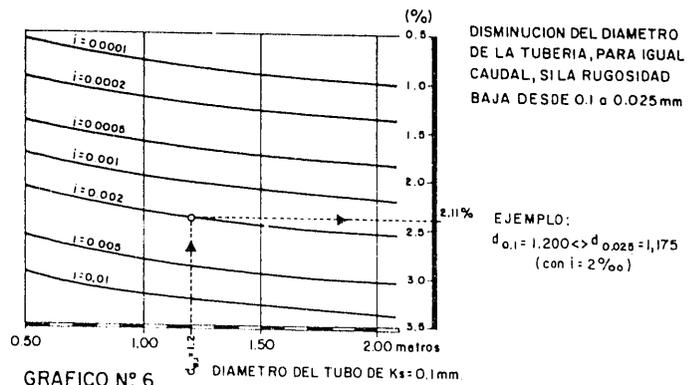
$$c + 1 = 1,4968 + \frac{1}{200 \times 1,4968} \left(\ln \frac{1,4968}{0,5 \times K_s} \right)^{1,4968}$$

De la igualación de caudales y pendientes, resulta:

$$Q = \frac{\pi d_1^2}{4} B_1 d_1^{b_1} i^{c_1} = \frac{\pi d_2^2}{4} B_2 d_2^{b_2} i^{c_2}$$

de donde |

$$d_2 = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{\frac{1}{2+b_2}} d_1^{\frac{2+b_1}{2+b_2}} i^{\frac{c_1+c_2}{2+b_2}}$$



Ejemplo: la relación de diámetros de tuberías para pasar de $K_s = 0,0125$ mm. a $K_s = 0,5$ mm. será:

$$d_{0,5} = \left(\frac{53,176}{34,880} \right)^{\frac{1}{2,6125}} d_{0,025} \frac{2,6319}{2,6125} i^{\frac{0,0346}{2,6125}}$$

Supuesto $d_{0,0125} = 0,70$ m. y $i = 0,001$, se obtiene $d_{0,5} = 0,7487$ m., que supone un incremento del diámetro de 6,95 %.

Si la pendiente hubiera sido del 5 %, al tubo de 700 mm. habría correspondido, a igual caudal, otro de 765 mm. (aumento del diámetro, 9,26 %).

En estos ejemplos hemos supuesto rugosidades muy diferentes, las más extremas del entorno considerado en nuestras fórmulas. Naturalmente, si son más próximos los valores de K contrastados, resultan menores los incrementos de dimensiones necesarios para igualar el caudal. El gráfico adjunto muestra el porcentaje de reducción de diámetro que permite un revestimiento de $K = 0,025$ mm., respecto de otro de $K = 0,1$ mm. para obtener el mismo flujo. La reducción es sólo del 1 al 3 %, variando con la pendiente piezométrica de que se disponga y, en menor medida, con el tamaño de la conducción.

5. RESUMEN Y CONCLUSION

La mayoración de la rugosidad del revestimiento de los tubos de hormigón preconizada por la «Instrucción del Instituto "Eduardo Torroja"» y el empleo de fórmulas hidráulicas inadecuadas para este tipo de material, repercute en un fuerte incremento de la pendiente de

cálculo de la conducción, que puede llegar a duplicar la que corresponde a la aspereza interna del tubo.

Este incremento es, además, variable con las dimensiones y caudales de la tubería, lo que supone un gran incertidumbre del proyectista sobre cuál es el «coeficiente de seguridad» que está aplicando al diseño de su conducción (lo que, tal vez le introduzca a adoptar mayores márgenes de error).

Al quedar infravaloradas las propiedades hidráulicas de los tubos de hormigón, los presupuestos de estas conducciones se encuentran en clara desventaja respecto a soluciones alternativas con tuberías de otros materiales, quizá menos satisfactorias en otros aspectos, pero cuya capacidad de transporte, según sus fabricantes, aparece como muy superior, al no aplicar en los cálculos hidráulicos coeficientes correctores a la pendiente piezométrica que corresponde a la rugosidad de sus revestimientos.

En nuestra opinión, el cálculo hidráulico de tuberías y, por lo tanto, el estudio de soluciones alternativas de una conducción, debe estar basado, fundamentalmente, en la *rugosidad contrastada* del material de revestimiento de los tubos, *sin mayoración* alguna de esta magnitud. Las pérdidas de carga en las juntas de tubos, que dependen de su hidráulica y número, deben ser evaluadas como pérdidas singulares, como también las creadas por válvulas, ventosas, diafragmas, etc. En último extremo, estas

pérdidas locales pueden ser equiparadas a longitud de tubería, lo que, en definitiva, equivale a mayorar la pérdida de carga total, pero dentro de unos límites conscientes y en una cuantía generalmente muy inferior a la que origina la propia rugosidad. En cuanto a los errores fortuitos a tener en cuenta al proyectar la tubería, pueden ser englobados en un resguardo de seguridad que, evidentemente, no tiene por qué ser función del material de revestimiento de los tubos.

Luis Torrent Rodríguez



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, promoción de 1950. Es Jefe del Servicio de Vigilancia de Presas del MOPU. En el INI (1956-1965) proyectó, bajo la dirección del Profesor Vallarino, los saltos del Cinca, central de grado I; chimeneas de San Sebastián, grado II; presas de Pías y Cubillos, embalse de Aumendrá, etc. Desde 1965 en el MOP, colaboró en el proyecto de abastecimiento a Madrid por bombeo desde el Alberche (AMSO) y dirigió las obras del tramo I (Elevación Reversible de Altomira) del trasvase Tajo-Segura. Fuera del país ha diseñado la chimenea del salto de Valdesia (República Dominicana) y dirigido el proyecto de centrales de bombeo del acueducto de Santa Elena (Ecuador), dictando en Guayaquil un curso sobre canales. Asiduo colaborador de esta Revista, sus publicaciones versan sobre hidráulica de conducciones, chimeneas de equilibrio, instalaciones de bombeo, etc., son esporádicas incursiones de «divertimento» en otros campos.