

TRASCENDENCIA ECONOMICA DE LA RUGOSIDAD DE LAS TUBERIAS

Por ENRIQUE MENDILUCE ROSICH

Dr. Ingeniero Industrial
Director General de Fibrolit, S. A.

El autor de este trabajo ha venido dedicando la mayor parte de su vida profesional al cálculo e instalación de tuberías, siendo de destacar su método de cálculo del golpe de ariete en impulsiones de gran resonancia nacional y cuya aplicación se va generalizando. Es autor de diversos trabajos sobre temas relacionados con las tuberías, algunos de ellos publicados en esta Revista, los cuales, orientados preferentemente hacia conclusiones prácticas, resultan de manifiesto interés. El nuevo trabajo que presentamos, realizado bajo la orientación apuntada, destaca documentadamente la importancia de la rugosidad de las tuberías, que es indudablemente el índice de su rendimiento hidráulico y, por lo tanto, de la rentabilidad de su aplicación.

Todas las particularidades de las distintas clases de tubería que nos ofrece el mercado tienen su importancia, y deben ser analizadas minuciosamente al estudiar un proyecto y decidir sobre su instalación.

Estas características son entre otras: su sistema de fabricación, resistencia mecánica, sistema de junta, longitud de los tubos, etc., recogidas todas ellas en el Pliego General de Condiciones Facultativas para tuberías del Ministerio de Obras Públicas, en vigencia provisional, que en el caso de obras oficiales descarga al proyectista de la preocupación expuesta en el párrafo anterior.

Pero existe otra cualidad en las tuberías muy conocida, pero no siempre tenida en cuenta, que es la única que tiene verdadera repercusión económica en la explotación de un abastecimiento de agua: nos referimos a su rugosidad, de la que depende el caudal que pueda transportar con un diámetro determinado.

Desde 1858, en que Darcy introdujo en su fórmula la rugosidad del conducto, han sido establecidas gran cantidad de fórmulas que pueden permitirnos el cálculo de las tuberías si aplicamos en ellas los coeficientes correspondientes, pero la aparición de nuevas clases de conductos y la evolución de sus sistemas de fabricación, en contraste con la escasa experimentación, hace que exista cierta desorientación, en cuanto al valor real de estos coeficientes de rugosidad aplicables a ciertas clases de conductos.

La Propuesta de Nueva Instrucción, para estudio y redacción de proyectos de abastecimiento de agua a poblaciones, de julio de 1965, se hizo cargo de la importancia de esta cuestión recomendando el empleo de determinados coeficientes según la clase de tubería, pero esta propuesta sigue en espera de su aprobación desde aquella fecha.

El aumento incesante de los caudales necesarios para el abastecimiento de las poblaciones exige tuberías cada vez mayores y aconseja la adopción de velocidades de transporte de agua crecientes, aprovechando al máximo los desniveles de que se dispone, y aunque las diferencias relativas de caudales proporcionados por las distintas clases de tuberías, para un mismo diámetro y desnivel, no varían, los valores absolutos de estas diferencias son de una importancia considerable y per-

miten reducir el diámetro de las de menor rugosidad, sin dejar de dar el caudal que las de mayor rugosidad con diámetro mayor.

Vamos a analizar prácticamente algunos casos reales para aclarar este concepto fundamental.

Hace más de diecisiete años se puso en servicio el abastecimiento de Alcalá de Henares, de 43 Km. de longitud, calculado para una dotación de 60 l./s., realizándose el estudio hidráulico del proyecto para determinado tipo de tubería, deduciendo de él los diámetros necesarios para el transporte del caudal fijado.

Adjudicada la obra mediante concurso, se ejecutaron éstas con otro tipo de tubería que el previsto en los cálculos hidráulicos, en diámetros de proyecto, y los aforos realizados a su terminación descubrieron que el caudal recibido era de 82 a 90 l./s., según la altura del agua en la presa, es decir, 50 por 100 mayor que el previsto, a causa de la menor rugosidad de la tubería de amianto-cemento utilizada.

Resulta evidente la repercusión económica de la elección de la clase de tubería realizada en su día, puesto que tratándose de un presupuesto total de veintidós millones de pesetas, la inversión representó doscientas cuarenta y cuatro mil cuatrocientas cuarenta y cuatro pesetas litro por segundo (244 444,00 ptas. l./s.), mientras que de haberse adoptado la tubería de proyecto con el mismo presupuesto la inversión hubiese sido de trescientas sesenta y seis mil seiscientas sesenta y seis pesetas, es decir, el 50 por 100 mayor.

Este exceso de caudal ha reportado al ayuntamiento unos ingresos muy saneados durante esos diecisiete años, permitiendo además un desarrollo a la población, que sin él se hubiese visto frenado mucho antes, por insuficiencia del abastecimiento de agua.

La valoración de los beneficios económicos apuntados en el párrafo anterior, no son fáciles de traducir a cifras, pero su sola exposición basta para comprender su gran importancia y trascendencia.

Examinemos otro caso reciente que juzgamos muy interesante.

Se trata del abastecimiento de agua a Guadalajara y Alcalá, proyectado por don Joaquín Gavala, de la Confederación Hidrográfica del Tajo, que deben recibir 700 y 600 l./s., respectivamente, mediante un tramo común con caudal, por consiguiente de 1 300 l./s., de 20 425 m. de longitud y diámetro de 1 000 mm. y un ramal de 800 mm. y 14 210 m. de longitud, para el caudal de 700 l./s.

El caudal de 600 l./s., para la otra población, se transportará mediante la ampliación de la conducción existente, no interviniendo en las consideraciones que vamos a hacer.

Entre las tuberías que el mercado ofrece para una instalación de estas características, destacan la de amianto-cemento, cuya fórmula de cálculo es:

$$V = 158 \bar{R}^{0,68} J^{0,56} \quad (1)$$

y las de hormigón de fórmula:

$$V = \frac{1}{n} \bar{R}^{0,666} J^{0,5} \quad (2)$$

La primera fórmula es aplicada para el amianto-cemento arrollado y comprimido sistema Mazza, desde hace unos veinticinco años y ha sido reiteradamente comprobada en todos los diámetros de serie, pero para mayor seguridad en los cálculos hidráulicos el ingeniero proyectista de Guadalajara analiza el comportamiento de la tubería de amianto-cemento en la conducción de Alcalá de Henares, y obtiene la conclusión de que la conducción a los quince años de uso sigue pro-

porcionando un caudal ligeramente superior al obtenido teóricamente de la fórmula de Scimemi (1).

Por considerarlas de gran interés exponemos a continuación las consideraciones hidráulicas citadas:

“La actual conducción tiene una longitud total de 43 348 m., y está constituida por tubería de fibrocemento de 500, 400, 350, 300 y 250 mm. de diámetro. Lleva en servicio quince años y fue calculada para un caudal de 60 l./s., aplicando la fórmula de Blasius a los desniveles existentes en cada tramo.”

“Las longitudes parciales de los distintos diámetros son:

φ 500 mm.	17 291,50 m.
φ 400 mm.	4 329,90 m.
φ 350 mm.	11 078,80 m.
φ 300 mm.	8 680,80 m.
φ 250 mm.	1 967,00 m.

TOTAL 43 348,00 m.

Los tubos de 400, 350, 300 y 250 mm. son de 5 atmósferas de presión de trabajo, pero los de 500 mm., con objeto de abastecer la obra, son de tan sólo 2 atmósferas de presión de trabajo. Esta circunstancia complica gravemente el problema, pues obliga a establecer una serie de roturas de carga que impiden sacar el máximo rendimiento a la tubería.”

“En cambio, ha podido comprobarse, después de los quince años de servicio, el pequeño coeficiente de rozamiento interior, ya que el caudal que normalmente circula es de 85 l./s., es decir, que la pérdida de carga es inferior no ya a la calculada por la fórmula de Blasius, sino de la que se obtiene con la fórmula de Scimemi.

Hagamos la comprobación: las pérdidas unitarias para cada diámetro y 85 litros por segundo, aplicando la fórmula de Scimemi, son:

φ 500 mm.	$l = 0,35 \text{ } ^{0}/_{00}$
φ 400 mm.	$l = 0,97 \text{ } ^{0}/_{00}$
φ 350 mm.	$l = 1,83 \text{ } ^{0}/_{00}$
φ 300 mm.	$l = 3,83 \text{ } ^{0}/_{00}$
φ 250 mm.	$l = 9,17 \text{ } ^{0}/_{00}$

Multiplicando estas pérdidas unitarias por las respectivas longitudes:

φ 500	$0,35 \times 17,2915 = 6,052 \text{ m.}$
φ 400	$0,97 \times 4,3299 = 4,200 \text{ m.}$
φ 350	$1,83 \times 11,0788 = 20,274 \text{ m.}$
φ 300	$3,83 \times 8,6808 = 33,247 \text{ m.}$
φ 250	$9,17 \times 1,9670 = 18,037 \text{ m.}$

TOTAL 81,810 m.

“La cota de la lámina de agua en la toma es la 705,51 y la del depósito de Alcalá 626,00; es decir, que el desnivel existente es:

$$705,51 - 626,00 = 79,51 \text{ pesetas.}$$

menor que el obtenido por la fórmula de Scimemi, lo que quiere decir que el rozamiento real es inferior al garantizado por el cálculo.”

Por comparación con los resultados de la fórmula de Scimemi, podemos dedu-

cir el valor del coeficiente n , correspondiente, para la utilización de la fórmula de Manning al amianto-cemento, pero esta comparación, efectuada ya por el autor de este trabajo ("Velocidad del agua en tuberías", REVISTA DE OBRAS PUBLICAS, enero de 1966), demuestra que el valor de n varía con el diámetro y la velocidad, y que, por tanto, esta fórmula no es idónea para esta clase de tuberías, en diámetros inferiores a 600 mm.

En cuanto a la tubería de hormigón, la fórmula generalmente adoptada por sus fabricantes en España, es la de Manning (2), recomendando algunos de ellos el coeficiente de rugosidad $n=0,012$.

Sin embargo, en el formulario para cálculo de tuberías de hormigón de C. Carril, se recomienda el coeficiente $n=0,013$, para el cálculo de estas tuberías por la fórmula de Manning, valor que coincide con el especificado en la "Propuesta de nueva instrucción para estudio y redacción de proyectos de abastecimiento de agua a poblaciones", a que antes hemos aludido.

Para terminar este punto diremos que tenemos referencias de que el Centro de Estudios Hidrográficos recomienda el coeficiente $n=0,014$, para tuberías de hormigón.

Con estos antecedentes es evidente que el ingeniero proyectista, ante el criterio general de la Dirección General de Obras Hidráulicas de admitir en las obras de abastecimiento cualquier clase de tubería, ha de meditar previamente la forma de orientar el estudio hidráulico del proyecto cuando la importancia de los caudales hace prever diferencias absolutas importantes de capacidad, de transporte, de las distintas clases de tubería.

Consciente de la trascendencia de esta cuestión, el ingeniero proyectista de Guadalajara introdujo en el Pliego de Condiciones la exigencia de que la pérdida de carga máxima de las tuberías ofertadas para los caudales de proyecto deberían ser las obtenidas por la fórmula de Manning, con el coeficiente $n=0,011$, para diámetros y caudales de proyecto.

A continuación hacemos el estudio de caudales hidráulicos comparativo, de proyecto, con tubería de amianto-cemento y con tubería de hormigón.

PROYECTO

Tramos	L	ϕ	Q	i	J
1.º	20 425	1 000	1 300	2,08	42,48
2.º	14 210	800	700	1,98	28,14
					<u>70,62</u>

Desnivel disponible: 72 metros.

TUBERIA DE AMIANTO-CEMENTO

Tramos	L	ϕ	Q	i	J
1.º	20 425	1 000	1 500	2,03	41,45
2.º	14 210	800	830	2,05	29,13
					<u>70,58</u>

Como vemos que el empleo de tubería de amianto-cemento en diámetros de proyecto nos proporciona caudales superiores a los necesarios, repetimos el cálculo, reduciéndolos parcialmente.

Tramos	L	ϕ	Q	i	J
1.º	9 392	1 000	1 300	1,57	14,75
	11 060	900	1 300	2,60	28,76
2.º	9 959	800	700	1,51	15,04
	4 232	700	700	2,87	12,15
					<u>70,70</u>

Obsérvese que en estos cálculos hemos dejado el margen de pérdida de carga adoptado por el proyectista y que la pérdida de carga total del primer tramo es similar a la del proyecto para evitar que una alteración en la cota piezométrica de la bifurcación, afectase al caudal del ramal de 600 litros segundo.

Estudiemos ahora la aplicación de tuberías de hormigón adoptando el coeficiente de rugosidad, recomendado por la "Propuesta de Nueva Instrucción", es decir, $n=0,013$.

TUBERIA DE HORMIGON ARMADO

Tramos	L	ϕ	Q	i	J
1.º	20 425	1 000	1 093	2,08	42,48
2.º	14 210	800	592	1,98	28,14
					<u>70,62</u>

Se observa que las tuberías de hormigón no pueden transportar los caudales exigidos con diámetro de proyecto, sino que queda reducido notablemente, por lo que es imprescindible aumentarlo según el estudio siguiente, u otro similar, que puede resolver igualmente la situación.

Tramos	L	ϕ	Q	i	J
1.º	14 700	1 100	1 300	1,76	25,87
	5 725	1 000	1 300	2,91	16,65
2.º	8 500	900	700	1,48	12,58
	5 710	800	700	2,77	15,81
					<u>70,91</u>

De los cuadros anteriores se desprende:

1º El diámetro de la tubería no tiene significado hidráulico, si no va ligado con la rugosidad.

2.º Con diámetros iguales, la tubería de amianto-cemento, proporciona un caudal del 37 al 40 por 100, superior a la tubería de hormigón, en el caso que analizamos.

3.º La tubería de amianto-cemento puede reducir el diámetro de proyecto, para ajustar el caudal al exigido y la tubería de hormigón debe aumentarlo con el mismo fin.

Es evidente que la segunda condición tiene una considerable repercusión económica que puede canalizarse hacia la inversión fija, rebajando el costo de la inversión para el mismo caudal o hacia la explotación aumentando el caudal con una inversión similar.

Ya que hemos llegado al aspecto económico de la cuestión, pasemos a analizar el resultado del concurso de esta interesante obra, mencionando únicamente las proposiciones más bajas con diámetros de proyecto, en cada tipo de tubería analizada y una variante con tubería de amianto-cemento, disminuyendo diámetros para ajustar el caudal.

El importe de las proposiciones que citamos fueron los siguientes:

196 489 884,51 con amianto-cemento y disminución de diámetro.

198 944 519,50 con hormigón y diámetros de proyecto.

206 865 828,10 con amianto-cemento y diámetro de proyecto.

Como la comparación de estas ofertas debe hacerse en las mismas condiciones y la única finalidad de la obra es transportar agua, esta condición de igualdad es el costo por litro y segundo.

En consecuencia:

$$a) \frac{196\,489\,884,51}{1\,300} = 151\,146,06 \text{ pesetas l./s.}$$

$$b) \frac{198\,944\,519,50}{1\,093} = 182\,016,94 \text{ pesetas l./s.}$$

$$c) \frac{206\,865\,828,10}{1\,500} = 137\,910,58 \text{ pesetas l./s.}$$

Si analizamos lo que antecede, vemos que se altera completamente el orden económico de las ofertas, puesto que la que en líquido del remate resulta más cara de las tres, es, evidentemente, la más interesante, ya que por un aumento del 4 por 100 sobre la oferta más baja de hormigón, proporciona un caudal del 37 al 40 por 100 más elevado, a la vez que rebaja en 44 106,36 pesetas, es decir, en el 24 por 100 el costo de la inversión por litro.

En forma absoluta la más barata es la de amianto-cemento con reducción de diámetro, pero asegurando 1 300 litros por segundo, y la más cara con mucha diferencia es la de hormigón, con reducción de caudal.

En el supuesto de que la proposición b), ofreciese aumento de diámetro para asegurar el caudal, se situaría dentro de las exigencias del Pliego de Condiciones, pero continuaría siendo más elevada que la c), que igualmente asegura el caudal de proyecto.

Se deduce de todo lo que antecede que si el ingeniero proyectista especifica el límite máximo de la pérdida de carga, como en el caso que analizamos, la Admi-

nistración deberá admitir la variación de diámetros, en aumento o disminución, necesaria para obtener el caudal de proyecto, con la clase de tubería propuesta.

Otra solución, a nuestro juicio la mejor, es que el ingeniero proyectista tantee previamente el diámetro necesario para conducir el caudal previsto, considerando las rugosidades respectivas de las tuberías que ofrece el mercado y si la diferencia permite adoptar distintos diámetros para conducir el caudal proyectado, establecer distintos presupuestos según el tipo de tubería.

Este es el caso de otra obra recientemente concursada, para el abastecimiento de León, proyectada por D. Mariano Palancar, de la Confederación Hidrográfica del Duero, de cuya memoria extractamos los párrafos en los que aborda esta cuestión:

“Conducción. Diámetros y tuberías. — Los diámetros a utilizar dependen fundamentalmente del material de las tuberías, por lo que consideramos necesario hacer un comentario previo a este respecto.”

“Tres son los tipos clásicos de tuberías para conducciones: fibrocemento, hormigón y fundición, cada uno de ellos con características peculiares que vamos a comentar. El fibrocemento tiene un coeficiente de rugosidad muy bajo, lo que se traduce en diámetros menores y una gran facilidad de reposición de tubos en caso de averías...”

“El hormigón, bien sea armado o con camisa de palastro, tiene un coeficiente de rugosidad superior al del fibrocemento y unas juntas de ejecución más laboriosa...”

“Finalmente, la fundición, material de larga tradición, es, desde el punto de vista hidráulico, desfavorable por la posibilidad de incrustaciones, y es más propenso a la corrosión, pero en cambio es de gran resistencia mecánica.”

“La pendiente piezométrica viene impuesta con el primer tramo, por la obligación de pasar por el collado de Robledo, resultando una pendiente piezométrica máxima de 0,0006, que para el caudal de 400 l./seg. corresponde a tubería de hormigón de 900 mm. de diámetro o de fibrocemento de 800 mm.”

“A continuación se dispone de mayor pendiente, pero debiendo ajustarnos a los diámetros comerciales de tuberías tanteeamos que los diámetros inferiores — 800 milímetros de hormigón y 700 mm. de fibrocemento — requieren una pendiente de 0,0011 para conducir los 400 l./seg.”

“Con objeto de disponer del necesario margen para pérdidas de otro tipo, hacemos la siguiente distribución de diámetros:

En los primeros 11 394 m. l.:	φ 900 mm. hormigón.	$i = 0,0006$
	φ 800 mm. fibrocemento.	
En los siguientes 4 157 m. l.:	φ 800 mm. hormigón.	$i = 0,0011$
	φ 700 mm. fibrocemento.	

“La pérdida de carga total $11\ 394 \times 0,0006 + 4\ 157 \times 0,0011 = 11,41$ m., y la altura disponible es $910 - 897 = 13$ m., quedando por tanto un margen de 1,59 m. para pérdidas en la toma, codos, etc., que es admisible.”

“Los cálculos están realizados empleando la fórmula de Manning Strickler para tuberías de hormigón:

$$V = \frac{1}{2,52 n} D^{2/3} i^{1/2} \text{ con } n = 0,013$$

y la fórmula de Scimemi:

$$V = 158 R^{-0,68} i^{0,56}$$

para tubería de fibrocemento.”

“Sifón. Diámetro y tuberías. — Como se dijo ya anteriormente, el caudal de cálculo para el sifón es de 300 l./seg. y el desnivel disponible entre cotas máximas de agua en los depósitos es de 897 — 880 = 17 m.”

“Para tener en cuenta pequeñas diferencias de nivel relativo de agua en los depósitos y pérdidas en codos, partimos de un desnivel utilizable de 15 metros.”

“La longitud del sifón es de 6 Km. en números redondos. Utilizando tubería de hormigón el diámetro apropiado sería el de 600 mm., cuya pérdida de carga para 300 l./seg. es de 0,0025, que en 6 Km. exactamente da 15 metros.”

“Con tubería de fibrocemento sería necesario utilizar dos diámetros para ajustarnos mejor al desnivel disponible, hemos supuesto tubería de 600 mm. de diámetro en los primeros 2 860 metros, en los que es suficiente tubería probada a 10 atmósferas, y el resto del sifón se realiza con tubería de 500 mm de diámetro probada a 15 atmósferas. La pérdida de carga total resulta ser:

$$\begin{array}{r} 2\ 860\ \text{m. l. de } \phi\ 600\ \text{mm.} \times 0,00132 = 3,78 \\ 3\ 140\ \text{m. l. de } \phi\ 500\ \text{mm.} \times 0,0032 = 10,07 \\ \hline 13,85\ \text{m.} \end{array}$$

resultando un margen algo superior al del caso anterior.”

“Los cálculos están hechos empleando las mismas fórmulas y tablas utilizadas para la conducción.”

Realizado el concurso, se registraron los siguientes resultados:

62 618 433,13 con tubería de amianto-cemento.

64 244 275,35 con tubería de hormigón pretensado.

y otras cuarenta y cuatro proposiciones más elevadas.

Como resumen de lo anterior y exponente de la trascendencia de la rugosidad, presentamos un cuadro que nos da una idea rápida de la correspondencia de diámetros para caudales similares e igual pérdida de carga, en tuberías de hormigón y amianto-cemento arrollado y comprimido, sistema Mazza, obtenido de la aplicación de las fórmulas de Manning con $n=0,013$, y Scimemi, expresando en litros-segundo los caudales y metros por kilómetro las pérdidas de carga, elegidas entre las correspondientes a velocidades próximas a 2 m./seg., en la tubería de hormigón.

CLASE	ϕ	Q	i	ϕ	Q	i
Hormigón	500	400	11,25	600	600	9,62
Amianto-cemento	450	460	11,25	550	710	9,62
Hormigón	700	800	7,45	800	1 000	5,66
Amianto-cemento	600	790	7,45	700	1 025	5,66
Hormigón	900	1 300	5,10	1 000	1 600	4,45
Amianto-cemento	800	1 390	5,10	900	1 750	4,45
Hormigón	1.100	1 900	3,77			
Amianto-cemento	1 000	2 100	3,77			

Se observa que en todos los casos se obtiene más caudal con un diámetro inferior de tubería de amianto-cemento, a excepción de uno en que prácticamente son iguales.

CONCLUSIONES

1.º El transporte efectivo del caudal previsto para un abastecimiento, es la única finalidad de este tipo de obras.

2.º El diámetro de las tuberías, consignado en el proyecto, no tiene ningún significado a efectos hidráulicos, si no va ligado a la rugosidad específica de las mismas.

3.º La modificación de diámetros en las propuestas, tanto en aumento como en disminución para ajustarlos al caudal exigido, según la rugosidad de las tuberías, no debe ser considerada como una variante al proyecto, puesto que el caudal es el que debe permanecer fijo.

4.º La comparación económica de dos proposiciones de diferente caudal, debe hacerse por la inversión que representa por litro y segundo.

5.º El organismo competente del Ministerio de Obras Públicas debería comprobar experimentalmente las fórmulas y coeficientes de rozamiento para los cálculos hidráulicos relativos a tuberías, propuestas por sus fabricantes.

6.º La Dirección General de Obras Hidráulicas debería recomendar a los proyectistas, mediante la correspondiente Instrucción, el cálculo del diámetro que, para el caudal a transportar, requiera cada clase de tubería, según su rugosidad.

La captación por la Administración de este problema y la formación de un criterio definido es urgente, puesto que la posición competitiva que la tubería de amianto-cemento, ha tomado en grandes diámetros, al emplear tubos de mayor longitud, reduciendo el número de juntas, y las que puedan tomar otras tuberías de similar lisura interna, han de plantear con frecuencia en el futuro situaciones análogas a las comentadas.