

A VUELTAS CON LA RUGOSIDAD DE LAS TUBERIAS

Por ENRIQUE MENDILUCE ROSICH

Premio March para la Investigación

"La rugosidad no define por sí sola la calidad de un tubo, pero es una característica específica, de repercusión económica directa en la instalación, que el proyectista no puede dejar de considerar en su verdadero valor al dimensionar las tuberías."

1. Introducción.

En nuestro trabajo *Velocidad del agua en las tuberías*, aparecido en esta Revista en enero de 1966, y utilizado posteriormente como introducción a la presentación, por primera vez en España, del ábaco y tablas de pérdida de carga de la fórmula universal (Colebrook) (1), aplicada a tubería de fibrocemento, analizamos y comprobamos diversas fórmulas establecidas para el cálculo hidráulico de tuberías con la pretensión de clarificar y orientar su utilización desde un punto de vista fundamentalmente práctico y experimental.

Con la misma finalidad preparamos el trabajo *Trascendencia económica de la rugosidad*, publicado también por esta Revista en octubre de 1967, en el que presentábamos una interesante comprobación práctica de la exactitud de la fórmula de Scimemi para el cálculo de pérdidas de carga de las tuberías de fibrocemento y su comparación con las que producen otras tuberías.

Ante el temor de que esta finalidad orientadora no la hayamos conseguido totalmente, nos vemos incitados a repasar nuestras ideas al respecto.

Decíamos en relación con las numerosas fórmulas exponenciales que han sido establecidas, con posterioridad a la genial idea de Chezy sobre la proporcionalidad entre la pérdida de carga y el cuadrado de la velocidad, que su similitud podía justificar la indecisión del proyectista en la elección de la más adecuada para el cálculo en cada caso.

(1) *Tablas de Colebrook para cálculo de tuberías de amianto-cemento*. Comercial Fibrotubo, S. A., 1966.

Partiendo de los trabajos de Darcy y Bacin, el concepto de la rugosidad de las tuberías aparece claro y ha sido el origen de los distintos coeficientes y exponentes, determinados experimentalmente por distintos especialistas que han dado su nombre, sucesivamente, a unas expresiones exponenciales que intentan interpretar analíticamente el movimiento del agua en las tuberías con la mayor aproximación posible.

Los trabajos de Kármán, Prandtl, Nikuradse y Colebrook introdujeron nuevos criterios en estos cálculos al hacer intervenir en ellos la viscosidad cinemática y la rugosidad relativa, todo lo cual queda plasmado en la llamada fórmula universal, de mundial aceptación como la más perfecta para el cálculo hidráulico que nos ocupa, que en el caso de conductos semirrugosos adopta, según Colebrook, la conocida expresión siguiente:

$$J = \frac{\lambda V^5}{2 g D}$$

en la que

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{R_e \sqrt{\lambda}} + \frac{K}{3,7 D} \right)$$

Es necesario destacar que, tanto esta fórmula universal como las exponenciales, están afectadas necesariamente por un coeficiente experimental que varían según la naturaleza del conducto y, concretamente, según su rugosidad interna. Con esto deseamos subrayar que no basta con que una fórmula interprete correctamente la ley de variación de la velocidad en función de los diámetros y pérdidas de carga, sino que es imprescindible, además, que el coe-

ficiente experimental que se aplique sea el específico para cada clase de tuberías.

2. Cálculo hidráulico de las tuberías en uso actualmente.

2.1. Fibrocemento.

Una de las características más destacadas de la tubería de fibrocemento, fabricada por el sistema "Mazza" de arrollamiento y compresión simultánea, es su mínima rugosidad interior permanente, lo que garantiza un caudal superior al de las tuberías de mayor rugosidad y, como es lógico, sus fabricantes se han preocupado, en primer lugar, de experimentarla y, después, divulgar esta cualidad, que no puede apreciarse en forma absoluta sino recurriendo a la comparación, la cual, a pesar de ser de discutible ética, resulta imprescindible.

En 1925 el profesor Scimemi establecía su primera fórmula para cálculo de las tuberías de fibrocemento:

$$V = 165 \bar{R}^{0,68} j^{0,56}$$

como resultado de su experimentación sobre conducciones de esta clase de tuberías: *Medida de la corriente en los tubos Eternit* (fibrocemento Mazza). Anales de la Escuela de Ingenieros de Padua, año I, núm. 1, 1925.

Posteriormente, en 1951, corrigió esta primera fórmula como consecuencia de nuevos estudios y comprobaciones durante veintiséis años, dejándola en la forma siguiente:

$$V = 158 \bar{R}^{0,68} j^{0,56}$$

o

$$Q = 48,3 D^{2,68} j^{0,56}$$

Esta fórmula corregida tuvo amplia divulgación en España desde 1954 (2), y las consiguientes comprobaciones por los fabricantes y los usuarios de las conducciones instaladas con esta clase de material.

Siguiendo el mismo proceso, una vez establecida la fórmula de Colebrook, fue determinado un primer valor de la rugosidad absoluta K , para la tubería a que nos referimos, fijándolo en 0,0125.

(2) Consideraciones sobre el cálculo hidráulico de las conducciones con tuberías de amianto-cemento. A. Margareta. Uralita, S. A., 1954.

En el Congreso de la Asociación Internacional de Distribuidores de Agua, celebrado en París en 1952, se aceptó esta fórmula, por unanimidad, como la expresión más exacta de la circulación del agua, fijándose diversos coeficientes para las distintas clases de tuberías y elevando a 0,025 mm. el de la de amianto-cemento.

Resulta lógica y obligada la comparación de los resultados obtenidos de la aplicación de estas dos fórmulas en sus expresiones definitivas, y por ello presentamos el siguiente cuadro de pérdidas de carga calculadas por la fórmula de Scimemi (S.) y Colebrook (C.) para distintas velocidades, iguales dos a dos. Así, por ejemplo, la tubería de 500 para un caudal de 200 l./s., que corresponde a una velocidad de 1,019 m./s., da una pérdida de carga, según Colebrook, de 1,51 m./Km., y para ese mismo caudal Scimemi da 1,53 m./Km.

Ø	V ≈ 1 m./s.		V ≈ 1,5 m./s.		V ≈ 2 m./s.	
	j m./Km.		j m./Km.		j m./Km.	
	S	C	S	C	S	C
50	25,10	24,87	51,78	51,88	86,56	87,97
100	13,36	13,05	22,33	22,13	37,33	37,64
200	5,47	5,34	10,34	10,33	16,53	16,80
300	3,06	2,98	5,12	5,10	10,57	10,90
400	2,67	2,65	4,46	4,52	6,64	6,85
500	1,53	1,51	3,16	3,21	5,28	5,45
600	1,32	1,31	2,21	2,22	4,55	4,78
700	1,30	1,30	2,18	2,23	3,64	3,83
800	1,15	1,15	1,92	1,98	2,86	2,99
1.000	0,85	0,82	1,36	1,40	2,28	2,41

Puede comprobarse la gran aproximación en los resultados de estas dos fórmulas, cuyas diferencias son despreciables frente a las que pueden producirse durante la nivelación y ejecución de la obra.

Efectuada esta confrontación, que nos demuestra que pueden ser utilizadas indistintamente cualquiera de estas fórmulas puesto que sus resultados son prácticamente iguales, no podemos olvidar que lo verdaderamente inte-

resante es la comprobación de que las pérdidas de carga reales concuerdan con las teóricas.

Por ello, entre las múltiples comprobaciones de que se dispone, destacamos como más representativa la conducción de Alcalá de Henares que, instalada con tubería de fibrocemento y puesta en servicio en 1950, continúa transportando un caudal de 85 l./s., superior incluso al que era previsible, dado el desnivel total disponible entre la toma y el depósito, según se acredita en los cálculos hidráulicos del Proyecto de Abastecimiento de agua de Guadalajara y Alcalá.

En efecto, en el cuadro siguiente hacemos el cálculo de las pérdidas de carga teóricamente necesarias, según las fórmulas que comparamos, para el caudal realmente proporcionado por la conducción.

Ø	L	i (S)	J (S)	i (C)	J (C)
500	17.291,50	0,35	6,05	0,31	5,36
400	4.329,90	0,97	4,20	0,92	3,98
350	11.078,80	1,83	20,27	1,77	19,60
300	8.680,80	3,83	33,25	3,78	32,81
250	1.967,00	9,17	18,04	9,23	18,15
	43.348,00		81,81 m.		79,90 m.

Desnivel disponible 79,51 metros.
Se consideran despreciables las pérdidas en reducciones curvas, etc.

Puede comprobarse que la pérdida de carga teórica calculada por Colebrook, para una conducción de 43 348 metros de longitud y diámetro decreciente desde 500 mm. en el origen hasta 250 en su final, con velocidades variables de 0,43 a 1,73 m./s., es 0,39 m. más elevada que la disponible, lo cual representa una increíble aproximación que perdura después de dieciocho años de servicio.

La fórmula de Scimemi nos da un aumento de pérdida de carga sobre la real de 2,30 metros, lo que representa un tranquilizador error por exceso del 3 por 100.

Efectuada esta satisfactoria comparación de los resultados teóricos de estas dos fórmulas entre sí y con la realidad y teniendo en cuenta

su facilidad operatoria, es lógico y eminentemente práctico recomendar, también, al proyectista, el uso de la fórmula más sencilla, que es la de Scimemi, que además nos proporciona un ligero margen de seguridad.

Nos satisface y rejuvenece recordar que esta obra, que constituyó, en su momento, una de las más importantes realizadas con tubería de fibrocemento, fue dirigida por el que suscribe en representación de la contrata.

No queremos terminar este apartado sin indicar que además de las fórmulas tratadas existen otras que, experimentadas para la tubería de esta clase, son muy utilizadas en otros países:

Hazen Williams $V = 119 \bar{R}^{0,63} i^{0,541}$
 Ludin $V = 134 \bar{R}^{0,65} i^{0,54}$
 Meyer-Peter $V = 135 \bar{R}^{0,68} i^{0,526}$
 Stuky $V = 140 \bar{R}^{0,64} i^{0,55}$

Asimismo, podemos utilizar la de

$$\text{Manning} \dots \dots V = \frac{1}{n} \bar{R}^{2/3} i^{1/2}$$

si bien los valores de "n" varían entre 0,008 a 0,010 según diámetro y velocidad.

Es decir, que cualquiera de las fórmulas que se conocen son aplicables, siempre que se las afecte de los coeficientes adecuados.

Naturalmente que al elegir la fórmula de cálculo deben quedar eliminadas en primer lugar aquellas que exigen varios coeficientes dentro de la misma clase de tubería, y después las que están menos experimentadas en tuberías de fabricación nacional.

Por este proceso no quedan más que la de Colebrook y la de Scimemi, cuya exactitud está comprobada a lo largo de veinticinco años y su empleo facilitado por la profusión con que se ha dotado a los técnicos interesados, de tablas, ábacos, etc., por los fabricantes de tubería de fibrocemento.

Es oportuno consignar que los componentes del amianto-cemento son únicamente cemento y amianto con determinado grado de humedad, y la lisura interna está proporcionada mediante la compresión de la hoja tierna sobre un mandril pulido. Se comprende con estos antecedentes que todos los tubos de amianto-cemento, fabricados por arrollamiento, sistema Maza, tengan la misma rugosidad interior que hemos definido y comprobado.

2.2. Hormigón centrifugado.

Es conocido que la fabricación de tubería de hormigón se realiza por diversos sistemas y que la finura de los áridos empleados puede variar, motivo por el cual se hace más necesario en este caso que cada fabricante establezca la rugosidad de la tubería que fabrica y proponga la fórmula para su cálculo.

Siguiendo esta norma, en 1958 se publicó en España, por una importante firma de tubería de hormigón, armada y centrifugada (3), un formulario para el uso de tuberías de esta clase, en el que se recomienda para su cálculo hidráulico la fórmula de Manning con coeficiente 0,013.

De acuerdo con nuestros razonamientos anteriores, vamos a demostrar que podemos hacer este cálculo por otra fórmula obteniendo prácticamente los mismos resultados. En efecto, hemos deducido el coeficiente que, aplicado a la fórmula de Scimemi, iguala sus resultados a los de Manning con el coeficiente citado:

$$V = 112 \bar{R}^{0,68} j^{0,56}$$

$$Q = 34,3 D^{2,63} j^{0,56}$$

A continuación, presentamos un cuadro en el que comparamos los caudales deducidos para la tubería de esta clase, aplicando la fórmula de Scimemi corregida para esta tubería y la de Manning con $n = 0,013$, para una misma pérdida de carga o desnivel.

\varnothing	i	Manning Q	Scimemi Q
500	0,003	207,0 l/s.	206,8 l/s.
600	»	336,7 »	337,1 »
700	»	508,0 »	505,7 «
800	»	725,2 »	728,9 »
900	»	992,9 »	1.000,3 »
1.000	»	1.315,0 »	1.325,0 »

Esta comprobación, realizada en los diámetros indicados para distintas pérdidas de carga y velocidades habituales de 1 a 2,5 m./s., con

(3) Formulario para el uso de tuberías de hormigón. Materiales y tubos Bonna, 1958.

diferencias máximas entre resultados del 5 por 100, apoyan nuestra afirmación de que cualquiera de las fórmulas exponenciales conocidas pueden corregirse para su aplicación a distintas tuberías, con gran aproximación, quedando también en evidencia, comparando directamente los coeficientes de las fórmulas de Scimemi para hormigón centrifugado y amianto-cemento, que para el mismo diámetro y pérdida de carga, estas últimas proporcionan un caudal 40 por 100 superior al de las de hormigón.

No debe descartarse la posibilidad de que algunos tipos de tubería de hormigón que se fabrican actualmente puedan ofrecer una rugosidad menor que la representada por el coeficiente $n = 0,013$ de Manning, pero esta circunstancia debe ser determinada experimentalmente y divulgada por su fabricante antes de que el proyectista de una instalación, con tal tubería, pueda utilizar, con garantía, un coeficiente de rugosidad menor para su cálculo.

Así, por ejemplo, una conocida y antigua firma que fabrica tubos de hormigón centrifugado en Francia utiliza la fórmula de Scobey:

$$V = 34 D^{0,625} j^{0,5}$$

que equivale a la fórmula de Manning con coeficiente $n = 0,012$, la cual podríamos usar y comprobar si fuésemos a instalar esta tubería francesa (4).

2.3. Plástico.

Aun cuando el Pliego General de Condiciones Facultativas de Tuberías del Ministerio de Obras Públicas no ha recogido las de plástico, no puede olvidarse su existencia y su gran rendimiento hidráulico, favorecido por la escasa rugosidad de su superficie interna.

Es conveniente hacer constar, a este respecto, que la tubería de plástico se fabrica por extrusión con compresión sobre su superficie exterior, lo que hace que las inevitables irregularidades superficiales y diferencias de espesor se reflejen interiormente, y lo que es causa de que su superficie interna sea menos lisa que la exterior y ligeramente ondulada, en el sentido de la generatriz.

(4) Cálculo hidráulico de conductos de hormigón. Société de Tuyaux Bonna.

Otra circunstancia que no debe olvidarse es que el diámetro nominal de estas tuberías es el exterior, por lo que para su cálculo hidráulico es necesario disminuirlo en el doble de su espesor: Así, por ejemplo, una tubería de P.V.C. de 250 mm. de diámetro nominal y 10 atm. de trabajo tiene un diámetro interior de 225 mm.

Admitimos, sin embargo, que su capacidad de transporte de agua pueda ser incluso superior a la del amianto-cemento, aun cuando creemos no está suficientemente experimentada en los diámetros habituales en los abastecimientos (5).

2.4. Fundición.

Los modernos sistemas de fabricación de esta clase de tubos centrifugados han reducido la rugosidad interior de los tubos nuevos, en relación con la de los fabricados por moldeado.

Según tablas de pérdida de carga para estos tubos nuevos, facilitadas por un importante fabricante (6), sus valores son similares a los obtenidos por Manning con $n = 0,013$, si bien la experiencia demuestra que su rugosidad inicial se ve incrementada con el tiempo por efecto de las oxidaciones, incrustaciones o tuberculizaciones si no van protegidas interiormente por recubrimientos.

2.5. Resumen.

Según los antecedentes y publicaciones que hemos mencionado, las tuberías examinadas quedan alineadas en dos grupos.

Las tuberías de plástico y amianto-cemento, que forman el grupo de las que pudiéramos llamar lisas, y las de hormigón y fundición, que son semirrugosas.

La repercusión de estas características en su capacidad de transporte queda reflejada en el siguiente cuadro, en el que se indica el diámetro necesario en las primeras para dar igual o mayor caudal que las segundas para la misma pérdida de carga.

(5) "Abaco para cálculo de tuberías en P.V.C. y PET". *La Technique de L'eau*, mayo 1963. — Folleto CICA 1965: "Comportamiento hidráulico de las tuberías de P.V.C.". Saenger, S.A.

(6) Catálogo manual de la Société de Fonderies de Pont-a-Mousson, 1963.

Amianto-cemento Plástico Ø int.	j	Hormigón Fundición nueva Ø int.
450	0,001 mm.	500
550	0,0005 »	600
650	0,0003 »	700
700	0,004 »	800
800	0,00175 »	900
900	0,0009 »	1.000
1.000	0,0005 «	1.100

El valor "j" de la pérdida de carga que se consigna es el mínimo que se precisa para que se cumpla la correspondencia del cuadro.

Así, por ejemplo, si se trata de conducir 750 l./s., y disponemos de un desnivel de 0,00175 m./m. será suficiente un diámetro de 800 milímetros si utilizamos fibrocemento o plástico, y necesario el de 900 mm. si empleamos hormigón o fundición, pero si el desnivel aumenta a 0,007 m./m., el caudal de 1 640 l./s., que puede conducir una tubería de amianto-cemento de 800 mm. de diámetro interior, superaría el máximo que en estas condiciones puede transportar la de hormigón centrifugado de 900, que sería insuficiente en este caso (7).

3. Conclusiones.

Dada nuestra conocida y ya antigua vinculación con los materiales de fibrocemento, sentimos gran preocupación en conseguir la máxima objetividad en nuestras consideraciones de carácter técnico, y por ello cuanto exponemos está fundamentado en las pruebas documentales presentadas.

Atendiendo la invitación del autor del artículo "Contribución al cálculo Hidráulico de tuberías", publicado en esta Revista en su número de octubre de 1968, a continuación exponemos nuestra opinión sobre las cuestiones en él planteadas.

3.1. Estamos de acuerdo en que la fórmula universal es la que mejor interpreta el movi-

(7) Para estos cálculos y comparaciones hemos utilizado las publicaciones que citamos en las notas anteriores.

miento del agua en las tuberías, conforme lo manifestamos ya en enero de 1966 en esta Revista, en párrafo que transcribimos:

"Sin embargo, puesto que conocemos la forma más racional de hacer estos cálculos, que es como hemos dicho, partiendo de las ecuaciones de Prandtl-Colebrook, parece lógico que implantemos en nuestro país lo que universalmente está sancionado, eludiendo la dificultad de cálculo mediante las correspondientes tablas calculadas para los tipos utilizados en la actualidad, de las que por interpolación o extrapolación pueden obtenerse valores intermedios o extremos."

Consecuentes con este criterio, por nuestra iniciativa se publicaron poco después estas tablas de pérdida de carga para tubería de fibrocemento con objeto de que la utilización de la fórmula universal quede a nivel de oficina de proyectos (publicación de la nota 1).

3.2. No puede olvidarse que aplicando esta fórmula también pueden plantearse los mismos problemas que preocupan al autor citado, si la rugosidad absoluta adjudicada a las distintas tuberías no corresponde a la real. Esto quiere decir que se obtendrán resultados más reales con una fórmula exponencial experimentada que con la universal, si la rugosidad absoluta utilizada en ésta no es la adecuada.

Por este motivo nos preocupamos de comprobar con datos experimentales los resultados de su aplicación, con el coeficiente adoptado por la IWSA en 1952, a la tubería de fibrocemento como detalladamente hemos expuesto.

3.3. El cálculo hidráulico de tuberías debe hacerse con las fórmulas facilitadas por sus fabricantes si su solvencia técnica está reconocida, ya que, lógicamente, son los que más experiencia tienen que poseer respecto a su comportamiento hidráulico, del cual deben responsabilizarse.

Es correcto, por tanto, que si en España queremos comparar hidráulicamente la tubería de fibrocemento con la de hormigón centrifugado, utilicemos los formularios de las notas 1, 2 y 3, avalado este último por un destacado especialista que, precisamente, representó a España en el Comité Técnico de la IWSA, encargado del estudio de la ponencia: "Fórmulas para el cálculo de tuberías", presentada al Congreso de París, 1952.

3.4. La rugosidad no define por sí sola la calidad de un tubo, pero es una característica específica con repercusión económica directa en la instalación que el proyectista no puede dejar de considerar, en su verdadero valor, al dimensionar las tuberías.