Nuevas formulaciones propuestas para el cálculo de las conducciones hidráulicas

Josep Maria Franquet-Bernis
UNED. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/7761

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se dimensionan las conducciones abiertas, los valores hallados de la velocidad media *V* y del caudal circulante *Q* correspondientes a una pendiente motriz **I** determinada, para diferentes radios medios hidráulicos *R*, resulta que las diferencias de cálculo obtenidas utilizando las fórmulas clásicas de Bazin, Ganguillet y Kütter, la simplificada de Kütter, Biel, Forchheimer, Manning-Strickler y Koeschlin, plantean serias dudas para la resolución de los casos ordinarios que se presentan en la práctica ingenieril.

Posiblemente, la revisión de estas fórmulas perdiera interés hace tiempo al tratarse, aparentemente, de un problema resuelto; por otra parte, prescindiremos de hacer un repaso exhaustivo de las mismas: expresión de sus ecuaciones, fundamentación, rango de validez, coeficientes, casos de aplicación..., por razones obvias de espacio. Desde luego, no se pretende poner aquí en tela de juicio la validez de estas formulaciones, que están universalmente reconocidas, aunque sí juzgamos necesario elaborar unas formulaciones propias que subsumieran estadísticamente los factores más relevantes de las anteriores, al tiempo que, a través del coeficiente de Fanning [1], facilitar su resolución para cada una de las doce categorías de rugosidad consideradas (transformación simple) o bien para todas ellas conjuntamente (transformación múltiple).

2. NUEVAS FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LAS CONDUCCIONES LIBRES

De este modo, una vez efectuado el cálculo correspondiente, se han elaborado diez tablas (dos para cada una de las cinco fórmulas estudiadas, a saber: Ganguillet y Kütter simplificada, Manning-Strickler, Bazin, Koeschlin y Forchheimer) y otra correspondiente al coeficiente promedio de Fanning, con diferentes valores del coeficiente de Fanning λ para cada una de ellas en función de las dos variables independientes o explicativas del problema: el grado de rugosidad de paredes y fondo K y el radio medio hidráulico R. Ver Tablas 1-10 en documento adicional.

A continuación, se establecen o definen las 12 categorías distintas de rugosidad (ver Tabla 12 en documento adicional) y se calcula el λ medio de cada casilla (obteniendo la media aritmética de los cinco valores homólogos mediante la correspondiente hoja de cálculo). Ver Tabla 11 en documento adicional.

Para ello, se ha tenido en cuenta la naturaleza diferente de las paredes y la solera de los cauces abiertos que se contemplan en las expresadas formulaciones. De esta manera, queda una nueva tabla que resume, en una sola, las cinco formulaciones clásicas expresadas.

Se calcula, por el método de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO), el ajuste no lineal de cada columna (rugosidad) en función de R, o sea, obteniendo la función: $\lambda = f(R)$, para cada categoría de rugosidad. Quedarán, entonces, 12 ajustes por mínimos cuadrados obtenidos por regresión no lineal. Las líneas de tendencia, afectadas con sus correspondientes coeficientes de concausalidad como el r^2, que es el coeficiente de determinación o crítico (que resulta muy elevado en todos los casos, produciéndose correlaciones prácticamente perfectas), así como por el valor del estadístico "F", pueden verse en la Tabla 13 del documento adicional.

De esta tabla se deducen, en todos los casos contemplados, unos resultados plenamente satisfactorios.

De hecho, la forma funcional analizada posee la configuración analítica:

$\lambda = AR^{-\alpha} = e^{-B} R^{-\alpha}$, siendo "A" una constante y "e" la base de los logaritmos neperianos.

K	V (m/s)	Q (m^3/s)
1	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.0026\ R^{-0.243}}} = 86.85\ R^{0.6215} I^{0.5}$	$86.85\ c\ R^{1.6215} I^{0.5}$
2	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.0032\ R^{-0.2891}}} = 78.29\ R^{0.63455} I^{0.5}$	$78.29\ c\ R^{1.63455} I^{0.5}$
3	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.004\ R^{-0.2952}}} = 70.02\ R^{0.6476} I^{0.5}$	$70.02\ c\ R^{1.6476} I^{0.5}$
4	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.0048\ R^{-0.3112}}} = 63.92\ R^{0.6556} I^{0.5}$	$63.92\ c\ R^{1.6556} I^{0.5}$
5	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.0062\ R^{-0.3308}}} = 56.24\ R^{0.6654} I^{0.5}$	$56.24\ c\ R^{1.6654} I^{0.5}$
6	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.008\ R^{-0.3545}}} = 49.51\ R^{0.67725} I^{0.5}$	$49.51\ c\ R^{1.67725} I^{0.5}$
7	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.0102\ R^{-0.3665}}} = 43.85\ R^{0.68325} I^{0.5}$	$43.85\ c\ R^{1.68325} I^{0.5}$
8	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.0133\ R^{-0.3914}}} = 38.4\ R^{0.6957} I^{0.5}$	$38.40\ c\ R^{1.6957} I^{0.5}$
9	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.0197\ R^{-0.4166}}} = 31.55\ R^{0.7083} I^{0.5}$	$31.55\ c\ R^{1.7083} I^{0.5}$
10	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.0268\ R^{-0.4222}}} = 27.05\ R^{0.7111} I^{0.5}$	$27.05\ c\ R^{1.7111} I^{0.5}$
11	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.0364\ R^{-0.4332}}} = 23.21\ R^{0.7166} I^{0.5}$	$23.21\ c\ R^{1.7166} I^{0.5}$
12	$\sqrt{\frac{2gRI}{0.0514\ R^{-0.4384}}} = 19.53\ R^{0.7192} I^{0.5}$	$19.53\ c\ R^{1.7192} I^{0.5}$

Tabla 14: Fórmulas propuestas para la velocidad y el caudal

Cod. 7761

A continuación, se aplica y simplifica la fórmula de la velocidad:

$V = \sqrt{\frac{2g}{\lambda}}\sqrt{RI} = \sqrt{\frac{2gRI}{\lambda}}$, substituyendo el valor obtenido de: $\lambda = f(R)$, con lo que quedarán 12 fórmulas (1 para cada categoría de rugosidad) en función de R y de I. Son las fórmulas universales propuestas por este autor.

De cualquier modo, para las 12 categorías de rugosidad (1-12), substituyendo los valores obtenidos, se tendrán, para cada caso, las siguientes funciones potenciales de la velocidad. Del mismo modo, para todos los casos, también puede resultar útil el empleo directo de la fórmula que nos ofrece el caudal: Q = SV, y/o substituyendo el valor del radio hidráulico medio por: R = S/c, siendo **c** el contorno o perímetro mojado del cauce en cuestión. Así, se obtendrán las siguientes expresiones.

También se han deducido fórmulas multivariantes para el cálculo de velocidades y caudales, obteniéndose, para cada supuesto:

- **Categorías de rugosidad del 1 al 12 (aproximación general)**:

$$V = \sqrt{\frac{2gRI}{R^{-0.3559}\, e^{-6.3388+0.2674\times K}}} = 4.43\sqrt{I\, R^{1.3559}\, e^{6.3388-0.2674\times K}}$$

- **Categorías de rugosidad del 1 al 6 (aproximación fina)**:

$$V = \sqrt{\frac{2gRI}{R^{-0.3006}\, e^{-6.1766+0.2185\times K}}} = 4.43\sqrt{I\, R^{1.3006}\, e^{6.1766-0.2185\times K}}$$

- **Categorías de rugosidad del 7 al 12 (aproximación final)**:

$$V = \sqrt{\frac{2gRI}{R^{-0.4112}\, e^{-6.8639+0.3236\times K}}} = 4.43\sqrt{I\, R^{1.4112}\, e^{6.8639-0.3236\times K}}$$

El caudal de la conducción, por otra parte, en función del contorno o perímetro mojado c (teniendo en cuenta que: Q = S·V, R = S/c), vendrá dado por las siguientes expresiones:

- **Categorías de rugosidad del 1 al 12 (aproximación general)**:

$$Q = 4.43\, Rc\sqrt{I\, R^{1.3559}\, e^{6.3388-0.2674\times K}} = 4.43\, cI^{0.5} R^{1.67795}\, e^{3.1694-0.1337\times K}$$

- **Categorías de rugosidad del 1 al 6 (aproximación fina)**:

$$Q = 4.43\, Rc\sqrt{I\, R^{1.3006}\, e^{6.1766-0.2185\times K}} = 4.43\, cI^{0.5} R^{1.6503}\, e^{3.0883-0.10925\times K}$$

- **Categorías de rugosidad del 7 al 12 (aproximación fina)**:

$$Q = 4.43\, Rc\sqrt{I\, R^{1.4112}\, e^{6.8639-0.3236\times K}} = 4.43\, cI^{0.5} R^{1.7056}\, e^{3.43195-0.1618\times K}$$

3. NUEVAS FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LAS CONDUCCIONES FORZADAS

3.1. ANTECEDENTES

Una explicación más exhaustiva al respecto puede verse en "material adicional web".

3.2. MÉTODOS

Debe tenerse en cuenta que conviene manejar un número relativamente alto de formulaciones o pruebas, puesto que la aproximación crecerá ordinariamente con su número. Y a pesar del comportamiento irregular de ciertas formulaciones o resultados individuales ("outliers"), los resultados promedios, en largas sucesiones de experiencias o formulaciones aplicadas a la resolución de un mismo problema, muestran una sorprendente regularidad [4].

También en el caso de las conducciones forzadas o a presión se presentan resultados dispares en la práctica, según la formulación empleada. Pues bien, idénticas formulaciones a las propuestas por este autor para el caso de las conducciones libres se pueden aplicar, con las correcciones correspondientes, en el cálculo y diseño de las conducciones forzadas. Para ello, se ha partido de las fórmulas correspondientes a las 6 primeras categorías de rugosidad de las conducciones libres, y que se expresan a continuación en la siguiente tabla, en función del material del tubo y para conducciones usadas o en servicio.

Dichas fórmulas, que pueden aplicarse con independencia del régimen hidráulico y el número de Reynolds (Re) que caracteriza al flujo, adoptarán la configuración general: $V = K_1 \cdot R^{\beta} \cdot J^{0.5}$, en la que se da la velocidad (m/s) en función del radio hidráulico (m) y de la pérdida de carga unitaria (m/ml). Ver Tabla 15 del documento adicional.

La formulación anterior, sin embargo, resulta más práctica de aplicar en función del diámetro interior (m) de la conducción y del caudal o gasto (m^3/s) circulante por la misma, con lo que, para el caso básico estudiado (tubería en servicio o usada), se tendrían, correlativamente, las siguientes expresiones de la Tabla 16, en las que también se ha despejado la pérdida unitaria de carga (m/m) y se han incluido las fórmulas intermedias obtenidas por interpolación lineal:

Estos valores deberán multiplicarse por los coeficientes de rugosidad relativos: α_2 (tubos nuevos) ó α_1 (tubos semi-nuevos), definidos por el autor del presente artículo, si interesa referirlos a estos nuevos estados de servicio o uso. Así mismo, según el uso o envejecimiento de la pared interior de la tubería, se propone la adopción de las siguientes correcciones, en las que se tiene en cuenta la evolución del radio hidráulico:

Para tuberías nuevas → $K'' = K \cdot \alpha_2$
Para tuberías semi-nuevas → $K' = K \cdot \alpha_1$

Los valores estimados de dichos coeficientes de rugosidad relativos, α_1 y α_2, se exponen en la Tabla 17 del documento adicional, para las tuberías sometidas a desgaste normal, junto con los coeficientes absolutos K_0, K_1 y K_2.

Las formulaciones propuestas tienen la ventaja de que, tal como sucedía en las conducciones libres, el exponente de la J es, en todos los casos:

$$\nu = \frac{1}{2} = 0.5$$

(sin embargo, dicho exponente, en su relación con la velocidad, puede ir desde 0.5 en régimen turbulento, que es el más normal, hasta 1.0 en régimen laminar); también en la fórmula explícita de la J el exponente de la velocidad V es m = 2.00, mientras que el exponente del diámetro interior β va aumentando progresivamente con el grado de rugosidad k, desde 0.6215 hasta 0.67725.

En este mismo orden de ideas, también podemos emplear para las conducciones forzadas la expresión multivariante obtenida para las conducciones libres, del tipo $k \in (1,6)$; que ofrecería una velocidad media (m/s) de:

$$V = 4.43\, e^{3.0883-0.1093\cdot k}\, R^{0.6503}\, J^{0.5}.$$

Rugosidad (k)	V (m/s)	Q (m^3/s)	J (m/m)
1.0	**36.69 $D^{0.6215}$ $J^{0.5}$**	**28.82 $D^{2.6215}$ $J^{0.5}$**	**0.000743 V^2 $D^{-1.243}$**
1.5	34.59 $D^{0.62802}$ $J^{0.5}$	27.16 $D^{2.62802}$ $J^{0.5}$	0.000845 V^2 $D^{-1.256}$
2.0	**32.48 $D^{0.63455}$ $J^{0.5}$**	**25.51 $D^{2.63455}$ $J^{0.5}$**	**0.000948 V^2 $D^{-1.2691}$**
2.5	30.51 $D^{0.6411}$ $J^{0.5}$	23.96 $D^{2.6411}$ $J^{0.5}$	0.001088 V^2 $D^{-1.2821}$
3.0	**28.53 $D^{0.6476}$ $J^{0.5}$**	**22.41 $D^{2.6476}$ $J^{0.5}$**	**0.001229 V^2 $D^{-1.2952}$**
3.5	27.14 $D^{0.6516}$ $J^{0.5}$	21.32 $D^{2.6516}$ $J^{0.5}$	0.001368 V^2 $D^{-1.3032}$
4.0	**25.76 $D^{0.6556}$ $J^{0.5}$**	**20.23 $D^{2.6556}$ $J^{0.5}$**	**0.001507 V^2 $D^{-1.3112}$**
4.5	24.06 $D^{0.6605}$ $J^{0.5}$	18.89 $D^{2.6605}$ $J^{0.5}$	0.001753 V^2 $D^{-1.321}$
5.0	**22.36 $D^{0.6654}$ $J^{0.5}$**	**17.56 $D^{2.6654}$ $J^{0.5}$**	**0.002 V^2 $D^{-1.3308}$**
5.5	20.86 $D^{0.6713}$ $J^{0.5}$	16.38 $D^{2.6713}$ $J^{0.5}$	0.002334 V^2 $D^{-1.3426}$
6.0	**19.36 $D^{0.67725}$ $J^{0.5}$**	**15.21 $D^{2.67725}$ $J^{0.5}$**	**0.002668 V^2 $D^{-1.3545}$**

Tabla 16: Expresiones propuestas de la velocidad, caudal y pérdida unitaria de carga para tuberías en servicio. Fuente: elaboración propia

La metodología a aplicar es fundamentalmente estadística. La bondad o ajuste de las formulaciones que proponemos se pone de manifiesto si se comparan con los resultados que ofrecen otras fórmulas de corriente aplicación al caso. Así, por ejemplo, tratándose de una tubería de fundición en servicio, se obtendrían, comparativamente, los caudales (expresados en l/s) que pueden verse en la Tabla 18.

De la contemplación de dicha tabla se deduce que la nueva formulación que proponemos ofrece valores intermedios para los tubos usados, en todos los casos, como ya se hizo notar con anterioridad, y más próximos al valor medio. Una visión más ilustrativa y exacta acerca de las diferencias o "discrepancias" existentes entre los valores calculados con cada formulación y la media de todas ellas, para cada caso, así como la comparación con la "desviación media con respecto a la media aritmética", puede verse en la Tabla 19, donde en cada casilla se han anotado dichas discrepancias, o sea, los valores: $(q_i - \bar{q})$. La desviación media absoluta en relación a la media aritmética (que es mínima en relación a la mediana) vendrá dada, en la última columna de la tabla anterior, por la expresión:

$$DM = \frac{\sum_{i=1}^{5\acute{o}6} |q_i - \bar{q}|}{5\acute{o}6}$$

y representa una medida de dispersión absoluta de la variable hidráulica "caudal", para cada caso. Para la puntuación de la bondad de la medida de aproximación a la media aritmética, se considera como "dato anómalo" o "outlier" todo aquel que cumpla la condición: $|q_i - \bar{q}| \geq DM$. De tal suerte, se ha señalado, en la última fila de la tabla anterior, el número de outliers (resultados anómalos o "incumplimientos") de cada una de las fórmulas estudiadas. El resultado así obtenido permite ordenar dichas formulaciones por su mayor credibilidad en atención a su discrepancia del valor "media aritmética" de todos ellos, resultando, en definitiva, la siguiente jerarquización por orden de mejor a peor:

1. FRANQUET (0 *outliers*).
2. HAZEN-WILLIAMS (4 *outliers*).
3. BIEGELEISEN-BUKOWSKY (5 *outliers*).
4. DARCY (6 *outliers*).
5. BIEL (6 *outliers*, con 2 pruebas menos).
6. KÜTTER (10 *outliers*).

Así pues, la formulación dimanante de nuestro estudio ha ofrecido, en los 12 casos analizados, unos resultados siempre por debajo de la desviación media absoluta en relación a la media aritmética, superando, a notable distancia, a la propia [5], que resulta ser la segunda mejor clasificada en base a estos mismos criterios.

Cuando pretendemos comparar magnitudes expresadas en distintas unidades o en distintas situaciones, para poder compararlas tendremos que hacerlas homogéneas, y este proceso de homogeneización de las diferentes magnitudes exige su "tipificación" o "normalización". Realizados los cálculos correspondientes, se ha elaborado la Tabla 20.

Si ahora comparamos los resultados ofrecidos por la suma de los valores absolutos de la variable tipificada para cada formulación, se observa que se mantienen parecidas conclusiones a las obtenidas por la aplicación del concepto de "medida de aproximación a la media aritmética". La formulación propuesta en nuestros trabajos [6,7] sigue resultando la mejor, la [8] supera ligeramente a la de Hazen-Williams y debe hacerse constar, también, que la formulación de [9] cuenta con 2 pruebas menos que de realizarse, sin duda, empeorarían sus resultados. Como casi siempre, en fin, los peores resultados los cosechan las formulaciones [10,11].

Posteriormente se han establecido los límites de confianza para la media μ de la población de caudales en el caso de que la varianza de la población de los caudales (medidos empíricamente y/o estimados a partir de una gran cantidad de fórmulas "ad hoc") sea desconocida, como es el caso que nos ocupa. Se han realizado los cálculos para los 12 casos, con un nivel de confianza del 95%. Para buscar el valor estandarizado de la serie, buscaremos en la tabla t-Student un nivel de probabilidad de:

$0.95 + \frac{0.05}{2} = 0.975$, con 4 g.l. para los dos primeros casos y 5 g.l. para los 10 restantes.

Por último, para la puntuación de la bondad de las formulaciones estudiadas, se ha elaborado la Tabla 21, en cuya última fila figura el número de "incumplimientos" o "rechazos", mientras que en la última columna aparece el número de aceptaciones de cada uno de los 12 casos analizados. Sobre las 70 pruebas o situaciones, se registra un total de 47 aceptaciones y 23 rechazos, o sea:

$\frac{47}{70} \times 100 \cong 67\%$ 67 (aceptaciones) y 33% (rechazos).

También el resultado de este nuevo análisis estadístico permite ordenar las formulaciones anteriores por su mayor grado de credibilidad atendiendo a su intervalo de confianza del 95%, resultando, en definitiva, la siguiente jerarquización por orden de mejor a peor de las fórmulas en cuestión:

1. FRANQUET (0 *outliers*)
2. BIEGELEISEN-BUKOWSKY (2 *outliers*)
3. HAZEN-WILLIAMS (3 *outliers*)
4. BIEL (3 *outliers*, con 2 pruebas o experiencias menos)
5. DARCY (7 *outliers*)
6. KÜTTER (8 *outliers*)

Obsérvese que los resultados obtenidos de este nuevo análisis

arrojan una clasificación bastante parecida a la que resulta del estudio de las "discrepancias" entre los valores de los caudales calculados con cada formulación y la media de todos ellos, para cada uno de los 12 supuestos contemplados; aunque aquí, como también se ha deducido del estudio de la tipificación de la variable "caudal", la formulación de Biegeleisen-Bukowsky supera ligeramente a la de Hazen-Williams. Además, y ello comporta una cierta lógica perfeccionista, su bondad experimenta una clara progresión cronológica.

Hay que hacer notar que ambos análisis han partido del supuesto práctico escogido al azar propuesto en su obra [12], pág. 138 y apéndice pp. 610-614, por lo que no cabe sospechar al respecto la realización de ningún tipo de manipulación o "adecuación" previa de los datos o bien de los resultados obtenidos.

Por último, se ha repetido el estudio para los tubos de fundición nuevos, sustituyendo las dos primeras formulaciones (Biel y Biegeleisen-Bukowsky) por las [13,14]. El resultado así obtenido permite ordenar dichas formulaciones por su mayor credibilidad en atención a su discrepancia del valor "media aritmética" de todos ellos, resultando, en definitiva, la siguiente jerarquización por orden de mejor a peor:

1. FRANQUET: (0 *outliers*).
2. LANG: (5 *outliers*).
3. HAZEN-WILLIAMS: (6 *outliers*).
4. KÜTTER: (6 *outliers*).
5. DARCY: (7 *outliers*).
6. LÉVY: (11 *outliers*).

Así pues, la formulación dimanante de nuestro estudio ha ofrecido, en los 12 casos analizados, unos resultados siempre por debajo de la desviación media absoluta en relación a la media aritmética, superando, a notable distancia, a la propia de Lang, que resulta ser la segunda mejor. La tipificación y el contraste de hipótesis de la variable "caudal" ofrecen, así mismo, unos resultados totalmente favorables a la formulación propuesta.

3.3. MATERIALES Y ENSAYO EXPERIMENTAL

El ensayo que realizamos intentaba reflejar las distintas comparaciones entre los datos teóricos, obtenidos por la aplicación de algunas de las distintas fórmulas de cálculo usuales, y los datos prácticos obtenidos mediante mediciones efectuadas "in situ" en tres tuberías de CLORURO DE POLIVINILO (37 m y diámetro interior de 56 mm), POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (316 m y diámetro interior de 113 mm) y FIBROCEMENTO (95 m y diámetro interior de 50 mm) de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Tortosa (Tarragona) y diferentes diámetros. Los datos precisos fueron proporcionados por la Empresa Municipal de Servicios Públicos, S. L., de capital público en su totalidad, que gestionaba el correspondiente servicio de abastecimiento de agua potable, en dicha ciudad, de forma directa y eficiente. La tubería de PVC era experimental y fue instalada expresamente a la salida de uno de los depósitos de abastecimiento de la población al objeto de poder realizar los cálculos y deducciones correspondientes.

Seguidamente, se adjuntan los planos de situación de las otras dos tuberías, que forman parte de la trama urbana de dicha ciudad.

Una explicación más exhaustiva de los materiales y procedimiento empleados en este ensayo puede verse en "material adicional web".

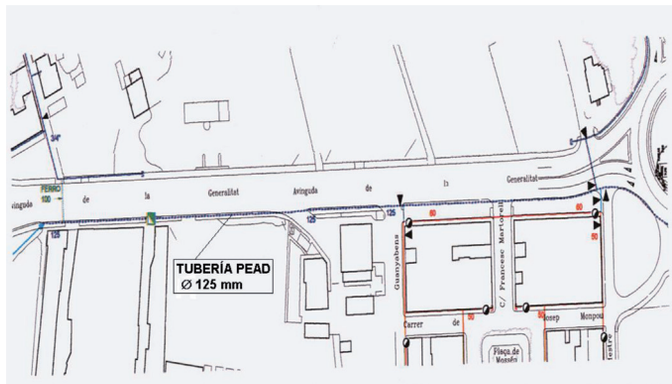


Figura 1: Tubería de PEAD (polietileno de alta densidad)

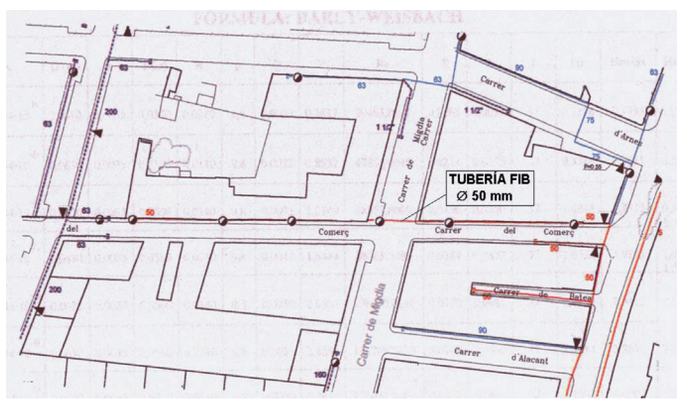


Figura 2: Tubería de fibrocemento

3.4. RESULTADOS

A continuación se llevó a efecto la comparación de los resultados obtenidos según los materiales dependiendo de la media de la diferencia existente entre la presión teórica que se deduce de las diferentes formulaciones (agregando a la pérdida de carga continua un 15% en concepto de las pérdidas de carga singulares de la red) y la realmente obtenida, para cada una de las tres tuberías en estudio. Para ello, se elaboraron las tablas y gráficos correspondientes en número de 25, una muestra de las cuales puede verse en la Tabla y gráfico 22 referidos a la formulación de Manning-Strickler-Gaukler para la tubería de PEAD, resultando lo siguiente:

a) PEAD:

- F. de Darcy-Weisbach = -3.2883
- F. de Blasius-Flamant = -3.2890
- F. de Manning-Strickler = -3.6326
- F. de Kütter = -1.1048
- F. de Hazen-Williams = -3.0870
- F. de Scobey = -2.2102
- F. de Franquet = 1.121 (1.5276)

Las fórmulas más cercanas a la realidad de nuestras tuberías, como puede comprobarse, son la de Kütter y la aquí propuesta de Franquet, aunque una lo es por exceso y la otra por defecto.

b) PVC:

- F. de Darcy-Weisbach = 0.3757
- F. de Blasius-Flamant = 0.4418
- F. de Manning-Strickler = 0.7108

- F. de Kütter = 2.3454
- F. de Hazen-Williams = 0.4358
- F. de Scobey = 0.7130
- F. de Franquet = 0.6860

En este caso, la fórmula que más se acerca al resultado obtenido en la práctica es la de Darcy-Weisbach.

c) FIBROCEMENTO:

- F. de Darcy-Weisbach = -3.4635
- F. de Scimemi = -4.6413
- F. de Blasius-Flamant = 1.2562
- F. de Manning-Strickler = 12.0355
- F. de Kütter = 3.6701
- F. de Hazen-Williams = 2.5505
- F. de Scobey = 3.2267
- F. de Meyer-Peter = 0.3240 (0.5685)
- F. de Ludin = -2.1607
- F. de Stucky = 2.9099
- F. de Franquet = 1.9583

En este último caso, la fórmula más próxima a la toma de muestras es la de Meyer-Peter, que es una fórmula especial para el cálculo de las tuberías de fibrocemento. También ofrecen buenos resultados las de [15] y Franquet. Sin embargo, las de von Ludin, Scimemi y Stucky [16] también son especiales para fibrocemento, pero no dan tan buenos resultados, como puede comprobarse.

Comparando las discrepancias de los valores resultantes de la aplicación de las 7 fórmulas anteriores para las 3 tuberías analizadas, en relación a los valores realmente obtenidos de las pérdidas de carga, se obtienen los resultados conjuntos de la Tabla 23.

Veamos, en fin, que para evaluar si se producen diferencias significativas entre la distribución de los valores de las pérdidas totales de carga obtenidas por aplicación de las 7 diferentes fórmulas estudiadas y la distribución realmente medida, resulta conveniente ensayar la hipótesis al nivel de significación del 0.10. Al respecto, recomendamos la consulta del anejo 3 de nuestro libro [6] en lo que se refiere a la prueba estadística del "Chi-Cuadrado" (pág. 562 y ss.).

En nuestro caso, el valor crítico de $\chi^2_{0.90}$ tendrá en cuenta el número de categorías o clases de cada prueba (8 para el tubo de PVC, 7 para el de PEAD y 6 para el de fibrocemento), con una unidad menos para el nº de grados de libertad. O sea:

$\chi^2_{0.90}$ (7 g.l.) = 12.0 (PVC) ; $\chi^2_{0.10}$ (7 g.l.) = 2.83 (PVC)
$\chi^2_{0.90}$ (6 g.l.) = 10.6 (PEAD) ; $\chi^2_{0.10}$ (6 g.l.) = 2.20 (PEAD)
$\chi^2_{0.90}$ (5 g.l.) = 9.24 (FIB) ; $\chi^2_{0.10}$ (5 g.l.) = 1.61 (FIB)

En cualquier caso, también la prueba o contraste de hipótesis χ^2 confirma plenamente la bondad de la formulación aquí propuesta para el cálculo de tuberías a presión.

4. CONCLUSIONES

La consideración de 12 categorías de rugosidad (K) de paredes y solera en las conducciones libres, según el tipo de cauce, permite al ingeniero calculista aplicar a dicho parámetro valores no enteros o intermedios entre 2 categorías correlativas, con lo que el margen de maniobra se amplía enormemente.

Ya en el caso de las conducciones forzadas o a presión, se confirma que la formulación aquí propuesta es la que ofrece más confianza desde el punto de vista estadístico comparándola con otras 5 formulaciones de empleo usual en el dimensionamiento hidráulico de tuberías y redes de distribución de agua agrícolas, industriales o urbanas, consiguiendo, con suficiente y expresiva claridad, mejores resultados que cualquiera de ellas.

Por último, los resultados obtenidos del ensayo experimental realizado en tres tuberías de polietileno, cloruro de polivinilo y fibrocemento ponen de manifiesto, una vez más, la bondad de la formulación que aquí se propone para el cálculo y dimensionamiento de las conducciones forzadas, ya que es la que ofrece menores discrepancias entre los valores observados en el ensayo y los teóricos.

PARA SABER MÁS

[1] Fanning, J. T. *A practical treatise on hydraulic and water-supply engineering: relating to the hydrology, hydrodynamics, and practical construction of water-works, in North America*. New York, D. Van Nostrand, 1902.

[2] Iben, O. *Druckhöhenverlust in geschlossenen eisernen Rohrleitungen*, página 60. Hamburgo, 1880.

[3] Hütte. *Des Ingenieurs Taschenbuch*, 16ª ed. Berlín, 1896, p. 240; 19ª ed., p. 248.

[4] García, A. *Inferencia robusta aplicada*. XI Cursos de verano de la UNED. Cambrils (Tarragona), 2000.

[5] Hazen, A. y Williams, G. S. *Hydraulic tables: the elements of gaggings and the friction of water flowing in pipes, aqueducts, sewers, etc., as determined by the Hazen and Williams formula and the flow of water over sharp-edged and irregular weirs, and the quantity discharged as determined by Bazin's formula and experimental investigations upon large models.* (3rd ed.), New York: John Wiley and Sons, OCLC 1981183, 1920.

[6] Franquet, J.M. *Cinco temas de hidrología e hidráulica*. Ed. Bibliográfica Internacional, S.L. – Universitat Internacional de Catalunya. Tortosa, 2003.

[7] Franquet, J.M. *Cálculo hidráulico de las conducciones libres y forzadas (Una aproximación de los métodos estadísticos)*. Ed. Bibliográfica Internacional, S.L. – Universitat Internacional de Catalunya. Tortosa, 2005.

[8] Bukowsky, J. *Systematische Windkanalmessungen an Luftschrauben*. Warszawa, 1942.

[9] Biel, R. *On the Head Loss in the Transfer of Liquid and Gaseous Fluids*. Berlin, 1907.

[10] Darcy, H. y Bazin, H. *Recherches hydrauliques entreprises par M. Henry Darcy continuées par M. Henri Bazin. Deuxième partie. Recherches expérimentales relatives au remous et à la propagation des ondes*. Paris, Imprimerie impériale, 1865.

[11] Kütter, W. R. *Allgemeine Bauzeitung, 35.* 1870.

[12] Forchheimer, P. *Tratado de hidráulica*. Ed. Labor, S.A. Barcelona, 1935-1950.

[13] Lévy, M. "Sur l'equilibre élastique d'une plaque rectangulaire". *Comptes Rendus*, v. 129. 1899.

[14] Lang, H. *Die Mängel der Ganguillet-Kutterschen Geschwindigkeitsformel für Flüsse und die Gefahren bei ihrer Anwendung auf gefüllte Rohrleitungen*. Zentralblatt der Bauverwaltung 51. 1931.

[15] Flamant, A. A. *Mécanique Appliquée – Hydraulique*. Baudry & Cie. París, 1891.

[16] Margaritella, A. *Consideraciones sobre el cálculo hidráulico de las conducciones con tuberías de amianto-cemento*. Ed. Uralita, S.A., 1954.

[17] Strickler, A. "Sektionschef des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft", *Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhigkeitszahl für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen.* Mitteilungen des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft. Bern, 1923.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7761-1.pdf