

Estudio de la rugosidad real de conducciones en servicio para el transporte de agua

Isabel León Martín (isabel.leon@cedex.es)

Luis Balairón Pérez (luis.balairon@cedex.es)

Francisco Ramón Andrés Martín (francisco.r.andres@cedex.es)

María Isabel Berga Cano (m.isabel.berga@cedex.es)

Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX)

1. Introducción

La normalización de los valores de la rugosidad de las tuberías para transporte de agua a presión se ha fijado tradicionalmente sin un apoyo experimental suficiente. Existe una gran disparidad de los valores de los parámetros representativos de la rugosidad recomendados según distintas fuentes, como puede observarse en la Figura 1.

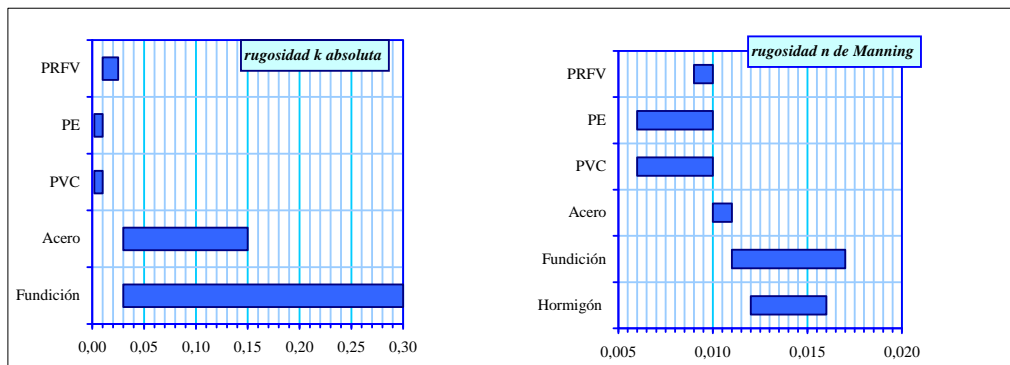


Figura 1. Valores recomendados de rugosidad para distintos materiales^[1]

La rugosidad se ha considerado históricamente una constante asociada a un material e independiente, por tanto, de las condiciones de flujo, el diámetro de la conducción, el tiempo en servicio de la tubería... hipótesis que, siendo mayoritariamente aceptada, no ha sido demostrada.

Por otra parte, las ecuaciones por las que se calcula la pérdida de carga en las que se emplea dicha rugosidad son, en su mayoría, de origen experimental, ignorándose en su uso habitual sus limitaciones y requisitos específicos de aplicación. Es destacable, además, la gran proliferación de las mismas.

A estos problemas se suma el desconocimiento de las condiciones reales de funcionamiento de las redes de agua a presión, tanto de abastecimiento como de riego, lo cual dificulta la correcta utilización de las fórmulas hidráulicas.

Es necesario remarcar la importancia que la estimación de la rugosidad tiene en los costes de una red de agua: la pérdida de carga repercute en el gasto energético y en la elección de elementos auxiliares, también asociados a una cuantía económica.

El CEDEX ha acumulado una importante experiencia en materia de normalización de conducciones en los últimos años, la cual sirve como base para emprender un proyecto de investigación que, a partir de la realización de ensayos en determinados tramos de redes existentes, permita verificar la bondad de los valores usualmente empleados hasta la fecha para la rugosidad de las conducciones.

2. Metodología

2.1. Ecuaciones hidráulicas

En primer lugar se aborda el estudio de las distintas ecuaciones de la hidráulica que determinan las pérdidas de carga. Se evalúan las condiciones en las que dichas expresiones pueden ser utilizadas y los posibles puntos débiles de las teorías que las respaldan.

Las pérdidas de carga continuas son aquellas debidas al rozamiento que el fluido ejerce sobre las paredes del tubo. Están relacionadas, por tanto, con la rugosidad (magnitud de medida de las protuberancias e irregularidades de la superficie). Las fórmulas para la evaluación de esta pérdida de carga pueden diferenciarse en dos grandes grupos.

Por un lado, desarrollos teóricos, basados en balances de fuerzas en elementos diferenciales de líquido circulante por la tubería. Dentro de las ecuaciones teóricas destacan la ecuación de Darcy-Weisbach, aplicable en todos los regímenes de flujo. Esta expresión introduce un factor de fricción f para el que han proliferado diferentes fórmulas, que también son objeto de estudio, y entre las que destaca la propuesta por Colebrook y White.

Por otro lado, fórmulas empíricas. La naturaleza de las ecuaciones experimentales hace que sean aplicables solamente a rangos concretos de funcionamiento y que, además, sean no adimensionales, existiendo parámetros dependientes de las unidades. Las unidades a utilizar en las ecuaciones del presente artículo corresponden al sistema internacional. En este segundo grupo las más conocidas y utilizadas son la ecuación de Hazen-Williams y la fórmula de Manning.

En la Tabla 1 se recogen las fórmulas citadas y otras de uso común, tanto para el cálculo de la pérdida de carga como para la evaluación del factor de fricción de Darcy, según el régimen de flujo de aplicación.

Tabla 1. Fórmulas para el cálculo de pérdida de carga en diferentes regímenes de flujo

Ecuación	Régimen de flujo				
	Laminar	Transitorio	Turbulento		
			Liso	Semirrugoso	Rugoso
Hagen-Poiseuille					
Darcy-Weisbach					
Blasius					
Prandtl-Von Karman					
Colebrook-White					
Swamme-Jain					
Christensen					
Kozeny					
Ritcher					
Manning					
Hazen-Williams					
Scimeni					
Scobey					
Cruciani Margarotia					
Veronese-Datei					
UNE 53959:2002					

Sombreado en verde: Fórmula para el cálculo de la pérdida de carga
Sombreado en azul: Fórmula para el cálculo del factor de fricción f

En el presente estudio la pérdida de carga se evalúa mediante la ecuación de Bernoulli, a partir de los datos reales obtenidos en campo en distintas redes de agua a presión y los complementariamente registrados en ensayos de laboratorio:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H$$

z: Cota, m

v: Velocidad, m/s

P: Presión, N/m²

g: Gravedad, m/s²

γ : Peso específico del fluido, N/m³

ΔH : Pérdida de carga, m

Dividiendo la pérdida de carga entre la longitud del tramo se obtiene la pérdida de carga por unidad de longitud:

$$J = \frac{\Delta H}{L}$$

J: Pérdida de carga por unidad de longitud, m/m

L: Longitud del tramo, m

Inicialmente se determinan tres parámetros indicativos de la rugosidad mediante la fórmula teórica y las dos empíricas que son mayoritariamente aceptadas y utilizadas:

- k, rugosidad absoluta: Mediante la expresión de Darcy-Weisbach se obtiene el factor de fricción f y se aplica Colebrook-White para la determinación de la rugosidad.
- n, coeficiente de rugosidad de Manning: Obtenido de la fórmula de Manning.
- C, coeficiente de Hazen-Williams: Calculado a partir de la ecuación de Hazen-Williams.

Se estudian a continuación, las fórmulas escogidas para obtener unos primeros resultados de la rugosidad analizándose su rango de aplicación y las especificaciones de cada una de ellas.

Darcy-Weisbach

Estos autores parten de la consideración de un volumen de control de un fluido que circula por una tubería y analizan las fuerzas que actúan sobre él: relativas al propio peso del fluido, a la presión del resto del líquido y al rozamiento con las paredes de la conducción. Mediante una serie de operaciones matemáticas obtienen, en 1857, que la pérdida de carga por unidad de longitud puede expresarse como:

$$J = \frac{f}{ID} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

ID: Diámetro interno, m

f: factor de fricción, adimensional

Colebrook-White

La fórmula de Colebrook-White (1939), considerada hoy en día la más exacta y universal, es válida para todos los tipos de flujo y rugosidades, y propone calcular el factor de fricción de Darcy-Weisbach según la ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{k}{3,71 \cdot ID} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

Re: Número de Reynolds, adimensional

k: Rugosidad absoluta, m

Existe gran disparidad en los valores de la rugosidad absoluta propuestos en diferente bibliografía (véase 2.2).

Manning

El ingeniero irlandés Robert Manning presentó, en 1889, una fórmula empírica para flujo en lámina libre. Posteriormente simplificada, se expresa en la actualidad como:

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

n: Coeficiente de rugosidad de Manning

R: Radio hidráulico, m

A pesar de ser concebida en sus orígenes para canales abiertos, hoy en día se utiliza de manera habitual para conductos a presión, donde el radio hidráulico es $\frac{1}{4}$ del diámetro a sección llena, transformándose la ecuación anterior en:

$$J = \frac{6,35 v^2 n^2}{(ID)^{4/3}}$$

Esta expresión debe emplearse sólo para régimen turbulento rugoso^[2].

Los valores recomendados para el coeficiente de rugosidad de Manning, relacionados con las irregularidades de la pared interna de la conducción, son muy diferentes según la bibliografía consultada (véase 2.2).

Hazen-Williams

La expresión empírica creada por Hazen y Williams relaciona la velocidad (v), el diámetro interno de la tubería (ID) y la pérdida de carga por unidad de longitud (J) mediante un coeficiente (C):

$$v = 0,36 \cdot C \cdot ID^{0,63} \cdot J^{0,54}$$

El coeficiente C de Hazen-Williams decrece al aumentar la rugosidad interna de la conducción. Se recomiendan diferentes valores de C según las fuentes consultadas, como puede observarse en la Figura 2.

Los experimentos de Hazen y Williams para la deducción de la ecuación anterior, formulada en 1902, incluyeron medidas en tuberías y en canales. La mayor conducción considerada tenía un diámetro de 3,66 m y un rango de coeficientes C entre 80 y 95. La mayoría de los tubos estudiados eran de diámetros inferiores a 1,78 m. De hecho, casi el 74% de los diámetros utilizados eran menores de 0,5 m, el 84% no superaba 1 m y el 92% eran inferiores a 1,5 m. Con respecto al flujo, el 71% de los casos analizados se relacionaban con Reynolds por debajo de $5 \cdot 10^5$ y el 80% con valores menores a 10^6 .

Para un cierto valor de rugosidad y de número de Reynolds, al aumentar el diámetro aumentan las posibilidades de encontrar condiciones adecuadas para la aplicación de la fórmula de Hazen-Williams^[3]. La precisión de esta fórmula ha sido ampliamente estudiada concluyéndose que si se considera la ecuación de Colebrook-White como exacta, se pueden cometer errores de hasta el $\pm 40\%$ ^[3].

Según algunos autores, la ecuación de Hazen-Williams está especialmente recomendada para acero y fundición dúctil. Esta expresión sólo se considera válida cuando es aplicada en régimen transitorio o en régimen turbulento liso ^[4] y para diámetros comprendidos entre 0,05 y 1,85 m.

2.2. Parámetros indicativos de la rugosidad

Como un segundo paso previo a la experimentación, se realiza una revisión detallada de los valores usualmente recomendados para la rugosidad de las conducciones en la principal normativa técnica y bibliografía. La Figura 2 es una compilación de los distintos parámetros indicativos de la rugosidad de las ecuaciones anteriormente estudiadas para fundición dúctil, material para el que se presentan resultados preliminares de este estudio en el epígrafe 3.

Rugosidad absoluta k (mm)			
	Mínimo	Habitual	Máximo
(1)	0,015	0,03	0,060
(1)		0,06	0,150
(2)	0,060	0,15	0,300
(3)	0,500		1,000
(3)	1,500		3,000
(4)		0,03	
(5)	0,003		0,100
(6)	0,030		0,100
(7)	0,030	0,10	3,000
(8)	0,150		0,500
(9)	0,150		0,250
(10)	0,250		0,600
(13)	0,050		0,125

n de Manning			
	Mínimo	Habitual	Máximo
(1)	0,010		0,014
(4)		0,017	
(7)	0,013		0,017
(11)	0,011		0,017

C de Hazen-Williams			
	Mínimo	Habitual	Máximo
(5)	130		80
(7)	120	110	90
(8)	100	60	90
(10)	130		80
(12)	130	120	110

(1) Twort, Ratnayaka y Brandt, 2000
 (2) Lencastre, 1987
 (3) Saenger, 1997
 (4) Asetub, 2001
 (5) Liria, 1995
 (6) Pont a Mousson, 1986
 (7) Mayol, 1988
 (8) Hernández, 1987
 (9) Osuna, 1987
 (10) Granados, 1986
 (11) King y Crocker, 1967
 (12) Uralita, 1987
 (13) Pürschel, 1978
 (14) Brater, 1996

Figura 2. Valores de rugosidad para fundición dúctil según distintas fuentes. Adaptado y completado de [1]

Los valores de la rugosidad propuestos en la bibliografía para el acero, material de la tubería utilizada en los ensayos complementarios que se realizan en laboratorio, oscilan para rugosidad absoluta k entre 0,01 y 2,4 mm, n de Manning entre 0,008 y 0,011 y C de Hazen-Williams entre 130 y 60 (véase Figura 2 referencias (2) para k , (7) para n y (12) y (14) para C).

2.3. Obtención de datos

Para la aplicación de las fórmulas anteriormente citadas, será necesario conocer, para un determinado tramo de conducción, valores de presión, caudal y cota, y adicionalmente longitud y diámetro. Asimismo, es preciso saber el material de la tubería y su antigüedad.

Para poder evaluar la pérdida de carga continua por aplicación directa de la ecuación de Bernoulli es necesario que cada tramo sea de un mismo material e igual diámetro y tenga una longitud que garantice la estabilidad del flujo (varios cientos de metros), y además, no pueden existir ni derivaciones ni discontinuidades (presencia de piezas especiales y valvulería) en la conducción elegida.

La experimentación se ha llevado a cabo en dos niveles diferentes: redes prototipo y laboratorio. Se pretende proponer valores de la rugosidad para redes reales en función de las principales variables de las que dependa y complementariamente, y para contrastar hipótesis e ideas que se desprendan de estos resultados, se realizan ensayos bajo condiciones controladas en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

Datos de redes prototipo

La obtención de datos reales requiere la colaboración de los gestores de redes de distribución de agua a presión.

Es de destacar la participación de la Empresa Municipal de Aguas de La Coruña (EMALCSA), la Universidad de La Coruña, concretamente la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, y del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC). Así mismo, Canal de Isabel II ha contribuido de manera importante a las investigaciones mediante un acuerdo de colaboración. Por otra parte, también se ha contado con Aguas de Barcelona (AGBAR) en este proyecto.

Como se ha indicado, las variables principales necesarias para los cálculos son cota, caudal y presión. La cota se encuentra normalmente registrada en los sistemas de información geográfica de las empresas gestoras junto con el material, el diámetro, la longitud y antigüedad del tramo.

En algunas ocasiones caudal y presión son magnitudes telecontroladas. En este caso bastaría con los datos que se puedan facilitar de los mismos, teniendo en cuenta que deben ser simultáneos en los dos extremos del tramo estudiado para la aplicación de Bernoulli y que, para un posterior tratamiento estadístico, será preciso disponer de varios cientos de datos.

En caso contrario, los tramos deben ser fácilmente accesibles para la medida in situ de estas variables tal y como se expone a continuación.

Para la medida del caudal se emplea un caudalímetro no intrusivo de ultrasonidos basado en la velocidad de propagación del sonido, similar al presentado en la Figura 3. El equipo, para velocidades superiores a 0,3 m/s, tiene una precisión de entre el 2% y el 5% para diámetros inferiores o iguales a 150 mm y oscila entre el 1% y el 2% para conducciones de mayor tamaño. El caudalímetro debe colocarse en una zona de la tubería en la que exista una distancia de 10DN aguas arriba y 5DN aguas abajo sin codos, discontinuidades o piezas especiales, asegurándose así la estabilidad del flujo medido.

La medida de la presión se realiza con un transductor, mostrado en la Figura 3, que convierte la presión en voltaje. Este dispositivo mide hasta 10 bares con una precisión de entre 0,15% y 0,25%. El sensor de presión se dispone en tomas en carga de la tubería realizadas a tal efecto. Cuando ello no es posible, se aprovechan las salidas de las ventosas, las de caudalímetros en los que se prevea medida externa o, como última opción, en desagüe mediante brida ciega.



Figura 3. Caudalímetro de ultrasonidos (izquierda) y sensor de presión (derecha)

En la toma de datos en campo, tanto en las medidas de caudal como en las de presión, se dispone de una batería para cada equipo que suministra la corriente necesaria para su funcionamiento, así como de un dispositivo de almacenamiento de datos que registra las medidas como voltaje (datalogger). El montaje puede observarse en la Figura 4. El registro se programa desde un ordenador portátil, desde el que además se comprueba la correcta medida de los equipos.



Figura 4. Mediciones en campo del caudal y la presión

Los datos registrados de presión y caudal están asociados a un instante determinado de tiempo de manera que se parte de series temporales para la aplicación de Bernoulli.

Datos de laboratorio

Para la obtención de datos bajo condiciones controladas de caudal y presión se utiliza el banco de ensayos que se observa en la Figura 5.



Figura 5. Banco de ensayos en laboratorio

La tubería donde se evalúa la pérdida de carga es de acero con un diámetro nominal de 110 mm. Tiene una longitud de 6 metros y pendiente horizontal.

El caudal circulante se registra mediante caudalímetros electromagnéticos, situados aguas arriba del tramo de estudio, conectados a un sistema SCADA desde el que se supervisan y controlan. El agua circulante por el modelo es aportada por las dos bombas que se observan en la Figura 5, también interconectadas al sistema de adquisición de datos, que pueden suministrar en conjunto un caudal de 200 l/s.

La presión se mide, para reproducir lo más fielmente posible las condiciones reales, con los mismos equipos utilizados en la obtención de los datos en campo y en igualdad de condiciones de instalación. La presión interna de la conducción objeto de estudio puede ser fijada entre un rango de valores deseados para un determinado caudal gracias a una válvula de mariposa situada aguas abajo del tramo. Estos datos se registran con los mismos dispositivos utilizados para las medidas en redes prototipo.

A partir de la información anterior, se procede al cálculo de las rugosidades reales y de laboratorio por aplicación de las fórmulas hidráulicas y a la comparación de los valores obtenidos con los valores teóricos tradicionalmente manejados.

3. Resultados preliminares

Se incluyen en este epígrafe resultados procedentes tanto de experimentación en redes prototipo como en laboratorio, indicando cuáles pueden ser algunos de los parámetros principales que condicionen las pérdidas de carga. Se trata de un análisis descriptivo de las tendencias observadas en los datos, siendo necesario un estudio más exhaustivo para la propuesta de valores de rugosidad real. Estas primeras ideas se basan en diferentes condiciones de velocidad encontradas en las redes: valores de diseño habituales, valores superiores a los mismos y valores inferiores. También se presentan tendencias observadas para régimen no permanente.

El material mayoritariamente estudiado ha sido la fundición dúctil (FD), por ser el más abundante en las redes de abastecimiento españolas, en un rango de diámetros nominales (DN) comprendidos entre 100 y 1000 mm.

En primer lugar se observa que, para velocidades de diseño habituales de aproximadamente 1 m/s, los valores de la rugosidad real de las redes en funcionamiento estudiadas son ligeramente superiores a los recomendados tradicionalmente en bibliografía.

Por ejemplo, para un tramo de DN 800, longitud 206 m, diferencia de cota de 20,48 m y una antigüedad de 7 años, se han registrado los valores de caudal y diferencia de presión entre extremos mostrados en la Figura 6.

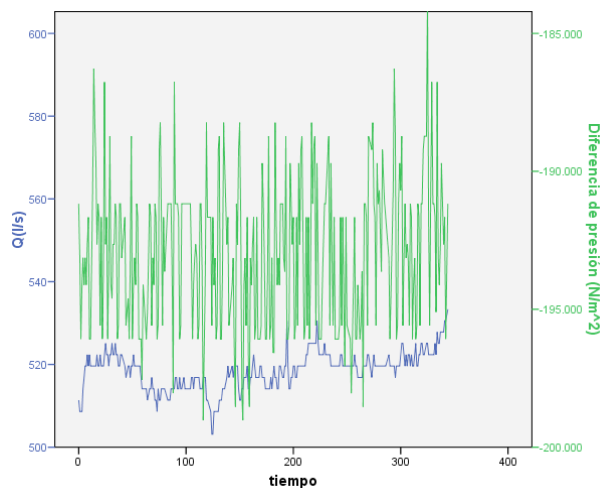


Figura 6. Medidas de caudal y diferencia de presión para un tramo de fundición dúctil DN 800

Calculando teóricamente las pérdidas de energía para este tramo, por el que circula un caudal medio de 518,7 l/s (velocidad de 1,03 m/s) y aceptando un valor de la rugosidad n de Manning de 0,014, de uso habitual, se obtiene una pérdida de carga de 0,37 m.

Sin embargo, experimentalmente se ha determinado un valor de 0,79 m. Con esta pérdida de carga, el valor n de Manning correspondiente es de 0,02, la rugosidad absoluta k de 23 mm y un valor de C de Hazen-Williams de 66; ligeramente superiores a los tradicionalmente empleados (véase Figura 2).

En otro caso de estudio, un tramo de conducción de DN 1000, el caudal y la diferencia de presión entre extremos registrados se presentan en la Figura 7.

La tubería de DN 1000 tiene una longitud de 355 m, una diferencia de cota de -57 m y se encuentra en servicio desde hace 15 años. El cálculo teórico de la pérdida de carga, para un caudal de 555,5 l/s (velocidad 0,7 m/s), tomando n como 0,014 supone un valor de 0,22 m mientras que los datos registrados arrojan valores de 1,5 m, de los que se desprende $n=0,038$, $k=229$ mm y $C=37$.

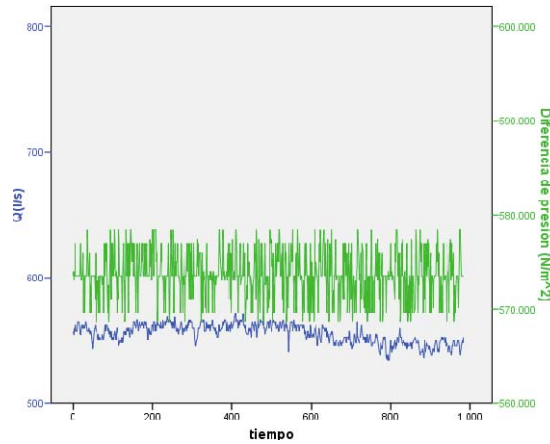


Figura 7. Medidas de caudal y diferencia de presión para un tramo de fundición dúctil DN 1000

El hecho de encontrar rugosidades ligeramente superiores a las esperadas para velocidades habituales también se pone de manifiesto en los ensayos en laboratorio: para una velocidad de 1,1 m/s el valor de n obtenido en el modelo es de 0,035, siendo un valor usual teórico para el acero 0,011.

Una mayor pérdida de carga puede deberse, entre otros factores, al envejecimiento de la conducción, una ligera falta de alineación y uniones con pequeñas discontinuidades.

Cuando las velocidades son superiores a las habituales, la tendencia observada es que los valores de la rugosidad se acercan más a los tradicionalmente propuestos por las fuentes bibliográficas.

Para un tramo de DN 400, longitud 673 m, diferencia de cotas de -71 m y con una antigüedad de 20 años, se ha registrado una velocidad media de 2,6 m/s. En la Figura 8 se consideran puntos anómalos los rodeados por un círculo por tratarse del primer dato registrado de una serie de ellos que se estabiliza tras éste. Para la rugosidad C de Hazen-Williams han sido obtenidos valores de entre 106 y 136.

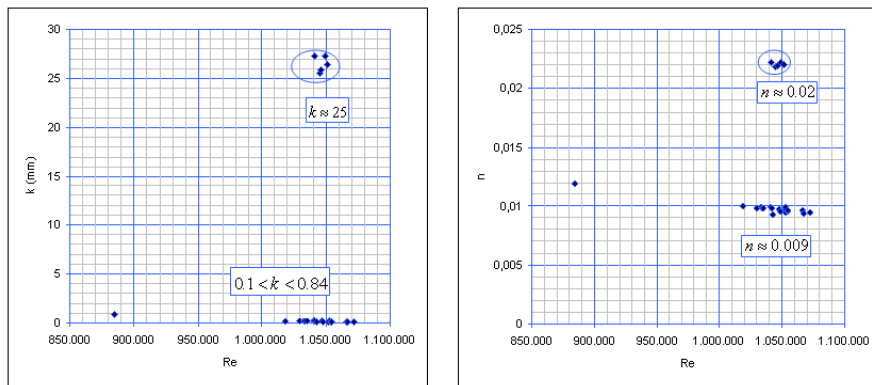


Figura 8. Resultados preliminares de valores de rugosidad real para un tramo de fundición dúctil DN 400

Los valores medios experimentales resultantes del tramo de fundición dúctil DN 400 son para la rugosidad absoluta k de 0,2 mm, n de Manning de 0,009 y $C=129$.

Los ensayos realizados en el laboratorio revelan valores de $k=3\text{mm}$, $n=0,015$ y $C=75$ para velocidades de 3 m/s.

Por otra parte, cuando las velocidades son muy pequeñas, del tratamiento preliminar de los datos se desprende que los valores de la rugosidad son muy elevados con respecto a los valores teóricos. Es necesario subrayar que frecuentemente las velocidades medidas en las redes objeto de estudio son inferiores a las velocidades óptimas de diseño de las mismas.

Esto se pone de manifiesto, por ejemplo, en el tramo de fundición dúctil DN 150 estudiado, que tiene una antigüedad de 2 años y una longitud de 535,17 m. La diferencia de cotas entre sus extremos es de 3,18 m y los datos de la diferencia de presión entre ambos, registrados conjuntamente con el caudal circulante, se reflejan en la Figura 9.

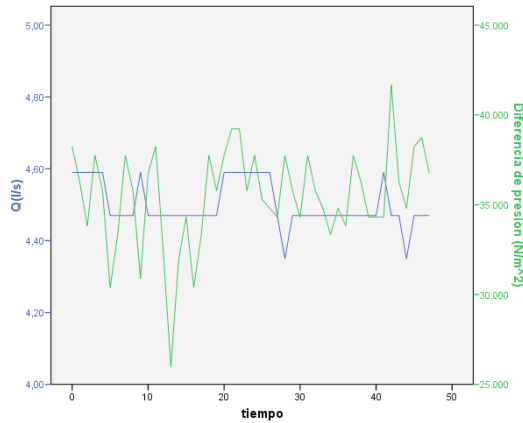


Figura 9. Medidas de caudal y diferencia de presión para un tramo de fundición dúctil DN 150

En el cálculo teórico de este tramo, donde el agua circula a una velocidad media de 0,25 m/s, considerando $n=0,014$, se obtiene un valor de 0,5 m de pérdida de carga. Partiendo de los datos mostrados en la Figura 9, la pérdida de carga real es muy superior y el valor de n experimental no es representativo.

También los datos de ensayos en laboratorio defienden esta hipótesis, obteniéndose valores de n de 0,14 para velocidades de 0,24 m/s.

Hay que tener en cuenta, además, que los errores de medida de los equipos experimentales serán mayores para velocidades pequeñas por lo que aumenta la incertidumbre y la dispersión de los resultados.

Para régimen no permanente se observan diferentes tendencias de los parámetros indicadores de la rugosidad en función del número de Reynolds en la Figura 11.

Puede señalarse que el coeficiente n de Manning es más robusto frente a las condiciones de flujo que el coeficiente C de Hazen-Williams siendo el valor de la rugosidad absoluta k el más sensible a las variaciones, tal y como cabía esperar por las ecuaciones mediante las que se obtienen.

Estos resultados proceden de tramos donde no ha sido posible el mantenimiento de un caudal constante, como por ejemplo un tramo de fundición dúctil DN 500 que corresponde a la entrada de un depósito de abastecimiento, cuyo llenado puede apreciarse en la Figura 10.

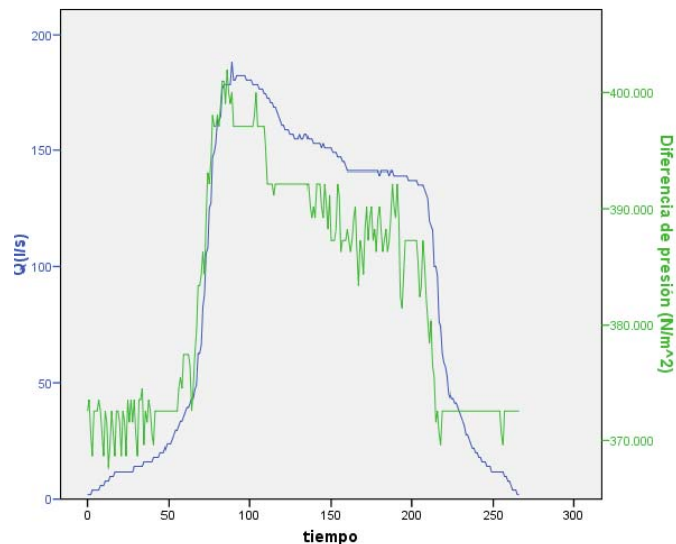


Figura 10. Medidas de caudal y diferencia de presión para un tramo de fundición dúctil DN 500

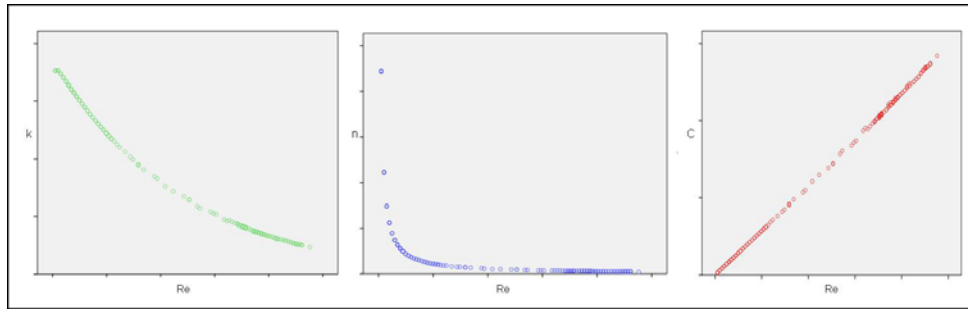


Figura 11. Tendencias de k , n y C (de izquierda a derecha) de resultados preliminares en tramos de caudal variable

4. Futuras líneas de investigación

Teniendo en cuenta los resultados anteriores así como las dificultades encontradas tanto en el estudio teórico como en la obtención de datos reales y su tratamiento, se enuncian posibles mejoras y futuras líneas de investigación.

En primer lugar será necesario un análisis de la incertidumbre en la determinación de los valores de rugosidad así como un cómputo estadístico de errores. También se aplicará la técnica de análisis singular espectral a las series temporales obtenidas.

Se pretende ampliar el estudio para diferentes materiales de las conducciones. Se compararán resultados para un mismo material y distintos diámetros y serán estudiadas sus tendencias en función de la velocidad y del número de Reynolds.

Las hipótesis e ideas que se desprenden de estos primeros resultados serán contrastadas con datos obtenidos en ensayos de laboratorio bajo distintas condiciones y también con la medida de un mayor número de tramos en redes de transporte de agua a presión.

5. Referencias bibliográficas

- [1] MINISTERIO DE FOMENTO Y MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. CEDEX. Guía Técnica sobre tuberías para transporte de agua a presión. Madrid, 2003. ISBN: 84-7790-384-0.
- [2] SÁNCHEZ JUNY, Martí; BLADÉ CASTELLET, Ernest; PUERTAS AGUDO, Jerónimo. Hidráulica. Manuais nº027. A Coruña: Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións, 2007. ISBN: 978-84-9749-260-7.
- [3] BOMBARDELLI, Fabián A. et al. *Hydraulic Design of Large-Diameter Pipes*. *Journal of Hydraulic Engineering* (Noviembre 2003) p. 839-846.
- [4] MAYS, Larry. *Water Resources Systems Management Tools*. Nueva York: McGraw-Hill, 2004. ISBN: 0-07-144381-9.