

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS

Petronilo E. Cortez Mejía, Velitchko G. Tzachkov, Jesús Figueroa Vázquez,  
J. Manuel Rodríguez Varela e Ignacio A. Caldiño Villagómez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Mor., CP 62550, Tel. (52)7773293678, México.  
E-mail: pcortes@tlaloc.imta.mx, velitchk@tlaloc.imta.mx, jesus.fiva@gmail.com, manuel\_rodriguez@tlaloc.imta.mx, icaldino@yahoo.com

## Antecedentes

La construcción y rehabilitación de infraestructura de agua potable, alcantarillado, uso agropecuario y otras, conlleva una gran demanda de tubería de diferentes diámetros y materiales, cuya definición depende principalmente del coeficiente de rugosidad, el cual generalmente se toma de catálogos de fabricantes de las tuberías y de la literatura técnica. Existe sin embargo una dispersión entre los datos de dicho coeficiente entre las diferentes fuentes bibliográficas, algunas de las cuales en realidad no se basan en ninguna comprobación experimental. En su aplicación en las fórmulas de pérdidas de carga por fricción, se utilizan valores constantes, particularmente para el coeficiente  $n$  de Manning, que generan incertidumbre en cuanto a valores para diferentes materiales y rangos de aplicación.

La Asociación de Tubería Corrugada de Polietileno, del Instituto de Tuberías Plásticas de los Estados Unidos de Norteamérica (CPPA-PPI, 2000) indica valores de  $n$  entre 0.010 y 0.012 para tubería de polietileno de alta densidad (PEAD) con interior liso, de 4 a 60 pulgadas de diámetro (100 a 1500 mm). Para tubería de PEAD con interior corrugado indica los siguientes valores de  $n$ : 0.015 para 3 a 6 pulgadas de diámetro; 0.016 para 8 pulgadas; 0.017 para 10 pulgadas; 0.018 para 12 a 15 pulgadas; 0.020 para 18 a 24 pulgadas.

La Universidad de Utah, también en los Estados Unidos de Norteamérica, realizó pruebas a tubo lleno en los que encontró un valor de 0.0123 para tubería de PEAD interior liso de 18 pulgadas, y 0.0119 para 12 pulgadas (Barfuss 1988). Más recientemente la Universidad de los Andes realizó estudios experimentales con flujo a superficie libre en tuberías de PEAD, para diferentes caudales, pendientes y perfiles de flujo, en los que para tubería de PEAD de 24 pulgadas (600 mm) con interior liso determinó una  $n$  de Manning de  $0.0123 \pm 0.0001$ , que según lo que reportan cubre el 100% de posibilidades de caudal y pendiente, para caudales entre 9.72 L/s y 97.2 L/s (CIACUA, 2009). Para policloruro de vinilo (PVC) el valor de  $n$  de Manning en el que coinciden muchos catálogos de fabricantes y la literatura técnica, es de 0.009 (Uni.bell 2017).

Por otra parte, por cuanto a la aplicación de valores constantes del coeficiente de rugosidad, Kammand (1988) propuso una ecuación en la que la  $n$  de Manning varía en función del diámetro y de la velocidad, a partir de las fórmulas de Darcy-Weisbach (D-W) y de Manning.

Esta gran variedad de valores, muchos de los cuales discrepan uno de otro, motivó la realización de un estudio experimental en Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) sobre tuberías de diferentes materiales, diámetros y condiciones de flujo y operación, con énfasis en PEAD y PVC, cuyos trabajos y resultados se describirán en el artículo completo.

## Metodología

En el Laboratorio de Hidráulica del IMTA (IMTALAB) se instalaron módulos de pruebas con flujo a presión y a superficie libre, con elementos de control de flujo y de medición de variables de prueba, incluyendo celdas de presión probadas con piezómetros, para la adquisición y procesamiento automático de

datos. Se realizaron pruebas en tuberías de PEAD y PVC de varios diámetros y a diferentes caudales, con la finalidad de determinar su coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning con tales variantes, dada la incertidumbre de la aplicación de valores constantes en estos materiales.

En la Figura 1 se muestra el módulo de pruebas a presión, y en la Figura 2 la ubicación de tomas de presión en el tubo de prueba de PVC de 6 pulgadas de diámetro. A su vez, en la Figura 3 se muestra el módulo de pruebas a superficie libre en el canal de fondo horizontal con que cuenta el IMTALAB, para aprovechar su infraestructura de alimentación, medición y recirculación, con la ubicación de las tomas de presión para piezómetros y celdas en tubo de prueba de PEAD de 12 pulgadas de diámetro.

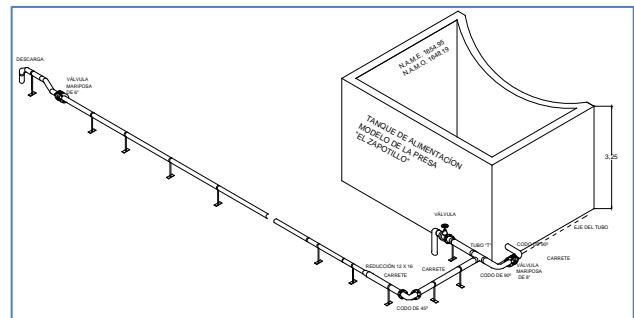


Figura 1.- Módulo de pruebas de tuberías con flujo a presión con conexiones a un tanque de baja altura y a un tanque elevado, ubicado dentro del IMTALAB.



Figura 2.- Ubicación de tomas de presión para piezómetros y celdas en el módulo a presión, en mediciones realizadas en tubería de PVC de 6 pulgadas de diámetro.

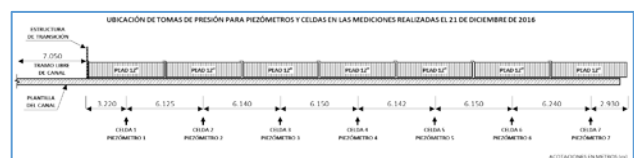


Figura 3.- Módulo de pruebas con flujo a superficie libre en el canal de fondo horizontal; ubicación de siete tomas de presión para piezómetros y celdas.

## Pruebas en el módulo con flujo a presión

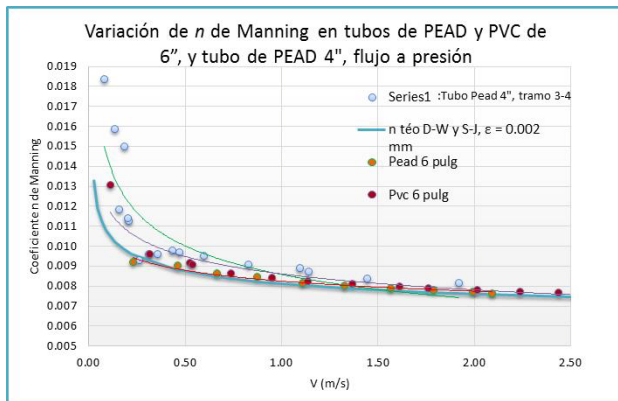
Aplicando en la ecuación de Darcy-Weisbach para la pérdida de carga  $h_f$  obtenida con los datos medidos, se evaluó el factor de fricción  $f$  del tramo de tubería, con la ecuación siguiente:

$$f = 2g \frac{D}{L} \frac{h_f}{v^2} \quad [1]$$

Se determinó luego la pendiente de energía o de fricción  $S_f$  como el cociente de  $h_f$  con la longitud  $L$  del tramo de tubería, y se calculó la  $n$  de Manning con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{1}{V} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad [2]$$

En los tubos de PEAD y PVC de 6 pulgadas de diámetro la velocidad del flujo  $V$  se varió de 0.25 m/s a 2.5 m/s. Para el tubo de PEAD de 4 pulgadas varió de forma aproximadamente igual. En la Figura 4 se muestra parte de los resultados experimentales, con la variación de  $n$  en función de la velocidad del flujo para cada uno de los tubos indicados. Como referencia se incluye la variación teórica aplicando la ecuación propuesta por Kammand (1988) para tubería de 6 pulgadas con rugosidad absoluta  $\epsilon=0.002$  mm.



**Figura 4.-** Variación de  $n$  de Manning experimental con flujo a presión, en tubos de PEAD de 4 y 6 pulgadas, y PVC de 6 pulgadas de diámetro.

### Pruebas en módulo con flujo a superficie libre

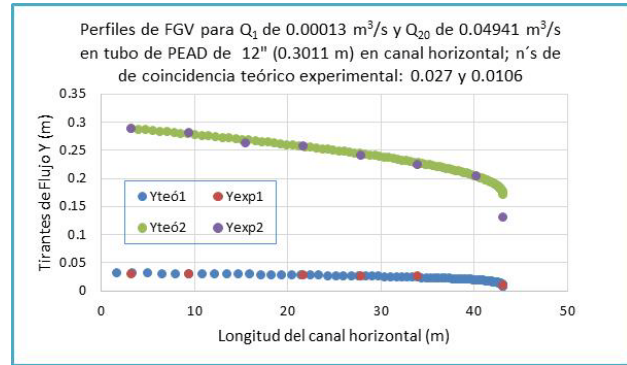
El perfil obtenido de la medición de tirantes a lo largo de la tubería se comparó con perfiles teóricos obtenidos a partir de la ecuación dinámica de Flujo Gradualmente Variado (FGV) para diferentes valores de  $n$ , cada uno para los diferentes caudales de prueba, de tal manera que aquel valor cuyo perfil mejor coincidía con el experimental se consideraba el valor buscado. La Figura 5 muestra el perfil de los tirantes experimentales ( $Y_{exp}$ ) y el perfil de los tirantes teóricos ( $Y_{teo}$ ), para caudales de  $0.00013 \text{ m}^3/\text{s}$  y de  $0.04941 \text{ m}^3/\text{s}$  en tubo de PEAD de 12 pulgadas.

Para el cálculo de los perfiles teóricos se hizo uso del software HIDRA-BAS, desarrollado en la División de Estudios de Posgrado en Ingeniería (DEPFI) Campus Morelos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) como tema de una tesis de maestría, el cual realiza el cálculo numérico con base en la Ecuación 3, la Ecuación 4, y la Ecuación 5 (Pérez Ostos, 2015).

$$\frac{dz}{dx} + \frac{d}{dx} \left( y \cos\theta + \alpha \frac{v^2}{2g} \right) + \frac{dh_f}{dx} = 0 \quad [3]$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S - S_f}{1 - F_r^2 \cos\theta} \quad [4]$$

$$S_f = \left( V \frac{n}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad [5]$$



**Figura 5.-** Perfiles de FGV teórico-experimentales para  $Q_1=0.00013 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_2=0.04941 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La  $n$  de Manning se evaluó de manera global también mediante la pendiente de energía de los tramos entre tomas de presión, donde se calculó la  $S_f$  con los tirantes medidos en extremos del tramo y la longitud del mismo, y se aplicó la ecuación (2). Los resultados son muy parecidos en ambos casos.

### Resultados y conclusiones

El coeficiente  $n$  de Manning no es una constante para una tubería dada, como generalmente se asume en la práctica, sino que depende de la velocidad del flujo, tanto para flujo a presión como para flujo a superficie libre. En pruebas con tubos de PEAD y PVC de 12 pulgadas de diámetro nominal, con flujo con superficie libre a gravedad sobre canal horizontal, en PEAD  $n$  varió de 0.030 a 0.0118, con velocidad media del flujo  $V$  desde menos de 0.05 m/s a cerca de 0.8 m/s, evaluada con pendiente de energía. En el tubo de PVC  $n$  se mantuvo alrededor de 0.009, para velocidades de 0.2 m/s a 0.8 m/s. En tubos de PEAD y PVC de 6 pulgadas de diámetro con flujo a presión, en ambos casos  $n$  varió de manera casi igual de 0.0095 a 0.0077, con  $V$  de 0.25 m/s a 2.5 m/s. Para PEAD a presión de 4 pulgadas  $n$  varió de forma aproximada a los dos valores anteriores.

### Referencias bibliográficas

- Barfuss, S. L.** (1988). *Friction Factor Tests on High Density Polyethylene Pipe-Hydraulics*, Report No. 204. Utah: Utah Water Research Laboratory-Utah State University Foundation.
- CIACUA (2009).** *Determinación del coeficiente  $n$  de Manning y de la rugosidad absoluta  $K_s$  de la tubería de Alcantarillado ADS 600 mm (interior liso)*. Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- CPPA-PPI (2000).** *TR 36-2000-Hydraulic considerations for corrugated polyethylene pipe*. Obtenido de PLASTICS PIPE INSTITUTE: <http://plasticpipe.org/publications/technical-reports.html>
- Kammand, F.** (1988). "Hydraulic friction factors for pipe flow". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 311-323.
- Pérez Ostos, L. G.-U.** (2015). *Hidra-Bas Versión 1.0.0-Sistema computacional de hidráulica de canales*, Tesis de maestría-DEPFI UNAM Campus Morelos. Jiutepec, Morelos: UNAM.
- Swamee, P., and Jain, A.** (1976). "Explicit equations for pipe-flow problems", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE 102 (5): 657-664.
- Uni.bell.** (26 de 09 de 2017). *Life cycle assessment of PVC water and sewer pipe and comparative sustainability analysis pipe materials*. Obtenido de PVC PIPE ASSOCIATION-Reports and Studies: [https://www.uni-bell.org/application/files/4015/0525/0523/Life\\_Cycle\\_Assessment\\_of\\_PVC\\_Water\\_and\\_Sewer\\_Pipe\\_and\\_Comparative\\_Sustainability\\_Analysis\\_of\\_Pipe\\_Materials.pdf](https://www.uni-bell.org/application/files/4015/0525/0523/Life_Cycle_Assessment_of_PVC_Water_and_Sewer_Pipe_and_Comparative_Sustainability_Analysis_of_Pipe_Materials.pdf)