

Flujo turbulento hidráulicamente liso en tuberías de polietileno (PE) en sistemas de distribución de agua potable.

*Laura Camila García, Juan Saldarriaga
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes*

El polietileno de alta densidad (PE) es un material que en los últimos años ha tenido mayor nombramiento a la hora de ser utilizado en redes de distribución de agua potable. Este material posee varias ventajas entre estas principalmente que, posterior a su utilización puede ser reciclado y tener otros usos, además, gracias a la flexibilidad de este puede adaptarse a diferentes terrenos. Por medio de este proyecto se busca verificar la precisión que tienen las ecuaciones de Colebrook-White, Darse-Weisbach y Prandtl von Kármán para determinar el coeficiente de rugosidad del material. El número de Reynolds para redes de agua potable se encontró en el rango de 4×10^4 a 5×10^5 y la rugosidad relativa se encontró en el rango 6×10^{-4} a 2×10^{-3} .

Introducción

A lo largo de los años el correcto uso, manejo y transporte del agua ha sido un tema de gran interés en las diferentes civilizaciones. Los sistemas de distribución de agua potable se encargan de transportar el agua potabilizada a los habitantes de una ciudad, es por esto por lo que son esenciales, debido a que su correcto uso y colocación se ligan directamente con el bienestar de las personas. De igual forma, son primordiales al prevenir eventos negativos de salud pública relacionados con calidad de agua. Por medio de este trabajo se busca: (1) establecer en que zona del diagrama de Moody típicamente se encuentran los números de Reynolds y la rugosidad relativa que suceden en los sistemas construidos a partir de tuberías de polietileno para determinar si las ecuaciones existentes tienen suficiente precisión y (2) como se comporta materiales recientes como el

polietileno (PE) al ser utilizados en estructuras de ingeniería civil, y si los métodos antiguos aún son compatibles con lo creado en la actualidad.

El polietileno fue un material desarrollado hacia los años cincuenta (50), un material relativamente moderno, las ecuaciones que existen para calcular las pérdidas por fricción y utilizadas en el presente proyecto tienen su origen en: Darcy-Weisbach (siglo XIX), y Blasius, Karman-Prandtl y Colebrook-White (siglo XX). Al momento de la creación de las ecuaciones los experimentos fueron realizados con los materiales existentes en la época, sin embargo, es importante actualizar y verificar el correcto funcionamiento y la aplicabilidad de estas. Como se mencionó anteriormente, si se garantiza la buena aplicabilidad de las ecuaciones se pueden disminuir errores en el diseño y colocación de los sistemas de distribución, esto genera beneficios económicos, sociales y de salubridad.

Las ecuaciones mencionadas en el párrafo anterior son utilizadas para estudiar las características experimentales que posee el fluido dentro de la tubería. La ecuación de Darcy-Weisbach es utilizada típicamente para explicar la pérdida de energía debida al movimiento de un fluido, en este tipo de conductos cerrados solo existe pérdida de energía por fricción (Saldarriaga, 2019), esta ecuación se encuentra descrita a continuación:

$$h_f = f \frac{L v^2}{d 2g} \quad (1)$$

donde d es el diámetro interno de la tubería, L es la longitud de la tubería, v es la velocidad del fluido, f corresponde al factor de fricción y g a la aceleración de la gravedad.

Paul R. H. Blasius determinó en 1911 una ecuación apta para flujos turbulentos hidráulicamente lisos, con número de Reynolds entre 5000 y 100000, que describe el factor de fricción como:

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (2)$$

La ecuación de Prandtl y von Kármán se fundamenta principalmente en la teoría de la longitud de mezcla de Prandtl, esta es descrita a continuación:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2 \log_{10} Re \sqrt{f} - 0.8 \quad (3)$$

Posterior a las ecuaciones anteriormente mencionadas, en 1939 C.F Colebrook y H. White buscaron desarrollar una ecuación que definiera el factor de fricción para el flujo transicional, después de esto, transformaron la ecuación de Prandtl y von Kármán obteniendo una ecuación válida para todas las zonas del flujo turbulento, esta se describe a continuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4)$$

donde k_s corresponde al coeficiente de rugosidad, Re corresponde al número de Reynolds, f corresponde al factor de fricción y d al diámetro interno de la tubería.

Antecedentes

La esencialidad de los sistemas de distribución de agua potable en las ciudades ha sido la principal razón de que constantemente se realicen investigaciones que garanticen no solo que funcionen adecuadamente, sino también, que se puedan optimizar sus procesos internos. En las últimas décadas el uso de materiales termoplásticos ha sido priorizado para el uso de sistemas de acueducto y alcantarillado, debido a esto, diferentes investigadores han centrados sus estudios en analizar como funciona el fluido dentro de estos.

La universidad de los Andes, recientemente, a cargo del profesor Juan Saldarriaga, desarrolló una investigación, hermana de la realizada ahora que, estudiaba y verificaba las ecuaciones de flujo turbulento para el material de PVC, en esta se determinó que para diámetros pequeños la ecuaciones de Prandtl von Kármán es más adecuada para describir el comportamiento del fluido, mientras que la de Colebrook-White se adapta mejor a diámetros mayores. El rango de

diámetros internos manejados en esta investigación oscilaba entre 81.84 milímetros a 209.42 milímetros.

Bernuth y Wilson (1989) estudiaron el factor de fricción para tuberías plásticas, PVC y polietileno, la longitud de estudio fue de treinta (30) metros. Ellos determinaron que la ecuación de Blasius era precisa para números de Reynolds con valores inferiores a $1 \cdot 10^6$. De igual forma, se recomendó la combinación de la ecuación de Blasius con la de Colebrook-White para obtener valores de factor de fricción precisos para diámetros pequeños. Por otro lado, tuberías de polietileno han sido estudiadas por Norum (1984), Urbina (1976) y Paraqueima (1977), los dos primero autores testearon tuberías con diámetros internos entre 8.9 milímetros y 21 milímetros, y el último utilizó dos diámetros internos: 15.5 milímetros y 17.6 milímetros.

Cardoso, Frizzone y Rezende (2008) estudiaron las pérdidas por fricción para tuberías de polietileno, en esta investigación se utilizaron diámetros internos de: 10 milímetros, 12.9 milímetros, 16.1 milímetros 17.4 milímetros y 19.7 milímetros; los números de Reynolds se encontraban entre 6000 y 72000 y la temperatura del agua era de veinte (20) grados centígrados. Otro estudio referente al tema fue el de Bagarello y demás autores (1995), en este se determinó que por medio de la ecuación de Blasius (valores teóricos) se podía describir el comportamiento del flujo y los valores del factor de fricción presentando errores del 10%, también se determinó que la condición del agua, es decir, su temperatura afecta el número de Reynolds.

Finalmente, Diogo y Vilela (2014) dirigieron una investigación en la universidad de Coimbra, utilizando tres diferentes materiales: tuberías antiguas de PVC con diámetros internos de 17.35 milímetros y 21.75 milímetros, tubería de polietileno de baja densidad con diámetro interno de 94.5 milímetros, tubería de polietileno de alta densidad con diámetro interno de 53.6 milímetros y tubería de PVC de cristal con diámetro interno de 35 milímetros. Una vez realizados los ensayos, ellos determinaron que la ecuación de Colebrook-White era una herramienta eficaz para determinar las pérdidas por fricción para regímenes turbulentos en los diferentes materiales testeados, ya que

explica una relación precisa y adecuada entre el número de Reynolds y el factor de fricción.

Adicionalmente, ellos establecen que para números de Reynolds inferiores a $1 \cdot 10^6$ la ecuación de Blasius muestran un comportamiento correcto.

Metodología

Las tuberías de polietileno en los últimos años han tomado mayor popularidad en el uso de acueductos, en el título B del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio 2010) establece que para zonas de suelos con vulnerabilidad baja de suelo es apto el uso de polietileno como material, además expone que, su uso es viable en sistemas de complejidad nivel medio y bajo, con diámetro de tuberías que oscilen entre 50 milímetros y 75 milímetros. Este reglamento también establece que para el polietileno el coeficiente de decaimiento es de: -0.05, y la rugosidad absoluta es de: 0.007 mm. De igual forma, el RAS establece que para tuberías de polietileno la velocidad mínima es de 0.5 m/s y la máxima es de 5 m/s.

Para este trabajo no se utilizaron grandes diámetros debido a que las tuberías de polietileno se usan principalmente en tamaños pequeños, ya que para tamaños grandes mayor, es más práctico utilizar materiales como concreto o hierro. A partir de esto, en la figura (1) se puede mostrar gráficamente el área de interés del diagrama de Moody de la investigación:

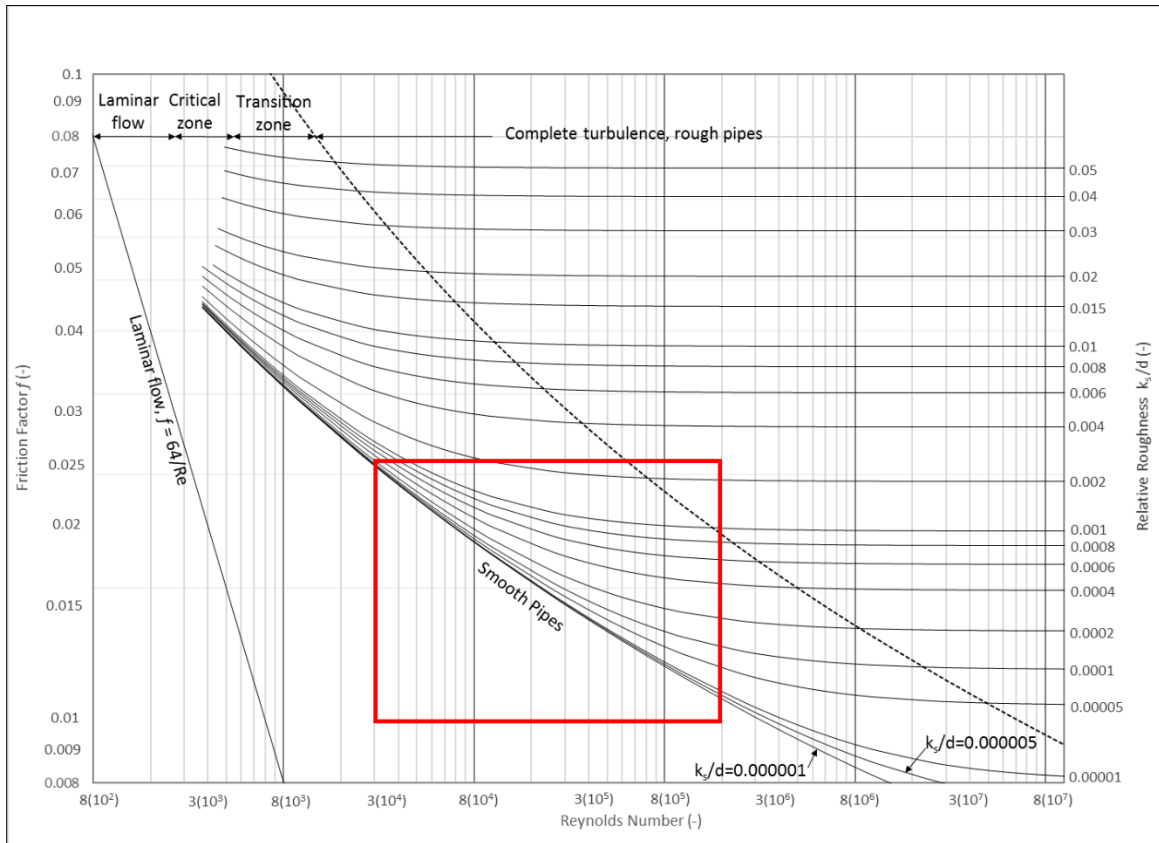


Figura 1. Área del diagrama de Moody en la que se contemplan diseños de sistemas de distribución para el polietileno.

Para poder realizar un correcto análisis del trabajo es importante delimitar el diagrama de Moody teniendo en cuenta las ecuaciones existentes para cada sección del diagrama. Este diagrama se construyó a partir de las ecuaciones (2), (3) y (4) para el régimen de flujo turbulento hidráulicamente liso. Para delimitar la región de flujo turbulento hidráulicamente rugoso se utilizó la ecuación de Prandtl von Kármán para este régimen:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} \right) \quad (5)$$

De igual forma, se delimito bajo la ecuación (6) de Colebrook-White para flujo hidráulicamente rugoso, esta a diferencia del flujo liso, se da cuando la subcapa laminar viscosa es superada en 6.1 veces por la rugosidad:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{56.6}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

Para el adecuado desarrollo de la investigación se midió la temperatura en grados centígrados del agua dentro de la tubería para cada toma de datos, a partir de esto se calculó la viscosidad y la densidad del fluido en el momento. Para la densidad se tomó la ecuación (7) que data de 1975 y publicada en Jones y Harris (1992), donde T corresponde a la temperatura en °C:

$$\rho = \frac{999 + 17T - 8 * 10^{-3}T^2 - 46 * 10^{-6}T^3 + 105 * 10^{-9}T^4 - 280 * 10^{-12}T^5}{1 + 16 * 10^{-3}T} \quad (7)$$

Para encontrar la viscosidad se utilizó la ecuación propuesta por Nieto (2011):

$$\nu = 4.7 * 10^{-14}T^4 - 1.09 * 10^{-11}T^3 + 1.04 * 10^{-9}T^2 - 5.48 * 10^{-8}T + 1.77 * 10^{-6} \quad (8)$$

Investigación

Para el desarrollo de esta investigación se realizaron seis (6) montajes, cinco de ellos en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes, localizado en Bogotá-Colombia y uno de ellos en la empresa Pavco-Mexichem. La figura (2) muestra el esquema general instalado en el laboratorio de hidráulica para todos los ensayos. Este montaje consiste en una tubería colocada de forma paralela al suelo que simula un tramo de un sistema de distribución, la tubería está conectada a un tanque elevado (a altura constante), que suministra el fluido y genera el caudal. Para poder llevar a cabo el proceso es necesario que el bombeo del tanque sea mayor que el de la tubería y que sea un circuito cerrado. De igual forma, en la figura (3) se muestra el montaje realizado en la empresa Pavco-Wavin y realizado por el estudiante Daniel Hernández (2018).

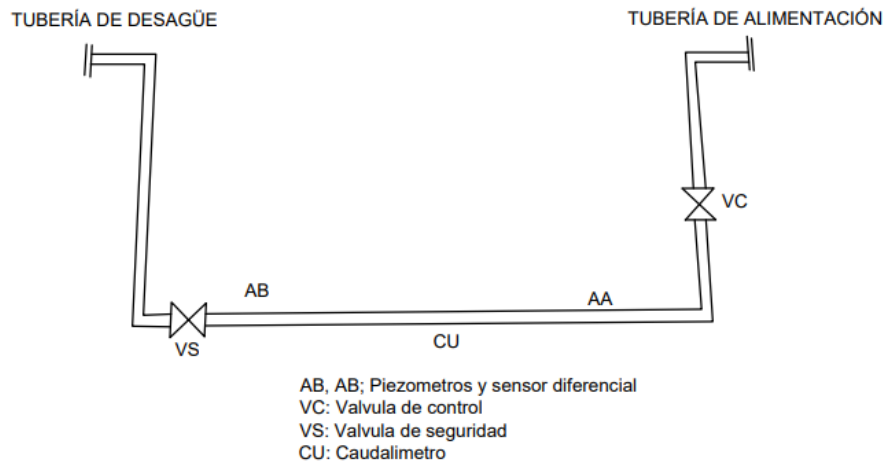


Figura 2. Esquema del modelo utilizado en el laboratorio de la Universidad de los Andes.

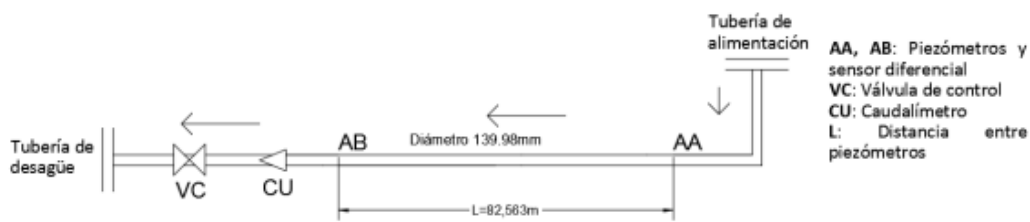


Figura 3. Esquema del modelo utilizado en la empresa Pavco-Wavin. Tomado de: Hernández (2018).

A las diferentes tuberías ensayadas se le colocaron piezómetros aguas arriba y aguas abajo que permitieran medir las pérdidas de fricción dentro de ellas, en total se colocaron cuatro mangueras, tres de ellas llevaban a piezómetros de mercurio, y una llegaba al sensor de presión diferencial. Para medir el caudal que se generaba se utilizó un caudalímetro no intrusivo. El sensor de presión diferencial utilizado pertenece a la marca Klay Instrumentes y es un DP-4000, este posee temperaturas de proceso entre -2°C y 100°C , la precisión es de $\pm 0.075\%$ con opción de 0.065% . El caudalímetro pertenece a la línea ultraflux y es un UF 801 P, este es útil en tuberías de diámetro de hasta 10 metros.

Dentro de las pruebas realizadas se utilizaron cinco tuberías pertenecientes a la empresa Pavco-Wavin, antiguamente Mexichem, esta es una empresa que produce tuberías de plástico y es

líder en la producción de implementos pertenecientes a sectores de la petroquímica, construcción, entre otros. Por otro lado, se utilizó una tubería perteneciente a la empresa Extrucol, esta compañía es la más grande en producción de tuberías y accesorios en material de polietileno en Colombia.

Descripción de los ensayos realizados:

- Ensayo 1: Tubería de polietileno con diámetro nominal de 63 milímetros, y diámetro interno de 51.16 milímetros. La longitud de la tubería instalada corresponde a 10.30 metros y la longitud entre piezómetros es de 8.20 metros. Este montaje no cuenta con uniones y los soportes utilizados garantizaban que la tubería estuviera completamente horizontal. Esta tubería pertenece a la empresa Pavco-Mexhicem. Realizado por: Eliana Naranjo.
- Ensayo 2: Tubería de polietileno con diámetro nominal de 75 milímetros y diámetro interno de 65.41 milímetros. La longitud de la tubería es de 10.50 metros y la longitud entre piezómetros es de 8.22 metros. Al igual que en el ensayo 1, no se contaba con uniones y la tubería estaba colocada de forma horizontal. (Pavco-Mexichem). Realizado por: Eliana Naranjo.
- Ensayo 3: Tubería de polietileno con diámetro nominal de 90 milímetros y diámetro interno de 71.71 milímetros. La longitud entre piezómetros es de 7.23 metros. (Pavco-Mexichem). Realizado por: Daniel Hernández.
- Ensayo 4: Tubería de polietileno con diámetro nominal de 160 milímetros y diámetro interno de 139.98 milímetros. La longitud entre piezómetro es de 82.563 metros, este ensayo corresponde al realizado fuera del laboratorio de la universidad de los Andes. (Pavco-Mexichem). Realizado por: Daniel Hernández.
- Ensayo 5: Tubería de polietileno de 63 milímetros de diámetro nominal y diámetro interno de 49.8 milímetros. La longitud entre piezómetro es de 6.76 metros. (Extrucol). Realizado por: Laura Garcia.

- Ensayo 6: Tubería de polietileno con diámetro nominal de 90 milímetros y diámetro interno de 72.4 milímetros. La longitud entre piezómetros es de 7.27 metros. (Pavco-Mexichem). Realizado por: Laura Garcia.

Resultados y análisis

Para calcular las pérdidas por fricción presentes en la tubería para cada muestra realizada, es necesario medir la pérdida como la diferencia de presión registrada entre las dos ubicaciones de los piezómetros. En los ensayos realizados en el laboratorio de la universidad, al realizarse con una sola tubería no fue necesario el uso de juntas o uniones, esto conlleva a que no sea necesario tener en cuenta las pérdidas menores por accesorios. Sin embargo, para la tubería ensayada por Daniel Hernández fue necesario tener en cuenta las pérdidas menores del montaje para esto se utilizó la siguiente ecuación:

$$hm = k_m * \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (9)$$

Por medio de la geometría de la tubería, que es conocida, y del caudal registrado, es posible encontrar la velocidad del fluido. De igual forma, a partir del caudal, es posible calcular el número de Reynolds, con estos datos es posible construir el diagrama para los diferentes ensayos.

En las pruebas realizadas la temperatura del agua registrada presentaba un rango que oscilaba entre los 18 °C y los 22°C. El rango de caudales utilizado variaba considerando el tamaño de cada tubería, sin embargo, se utilizaron los números de Reynolds no menores a 60000 (aplicable para los últimos dos ensayos realizados), y el máximo número de Reynolds correspondía al máximo posible generado. Se puede observar que en todos los ensayos realizados los resultados obtenidos corresponden a flujo turbulento hidráulicamente liso (FTHL). En el RAS se encuentra que la

rugosidad absoluta para el polietileno es de 0.007 mm, sin embargo, se puede determinar que esto varía con respecto a cada ensayo.

En la figura (4) se muestran los resultados obtenidos para los ensayos realizados por Eliana Naranjo:

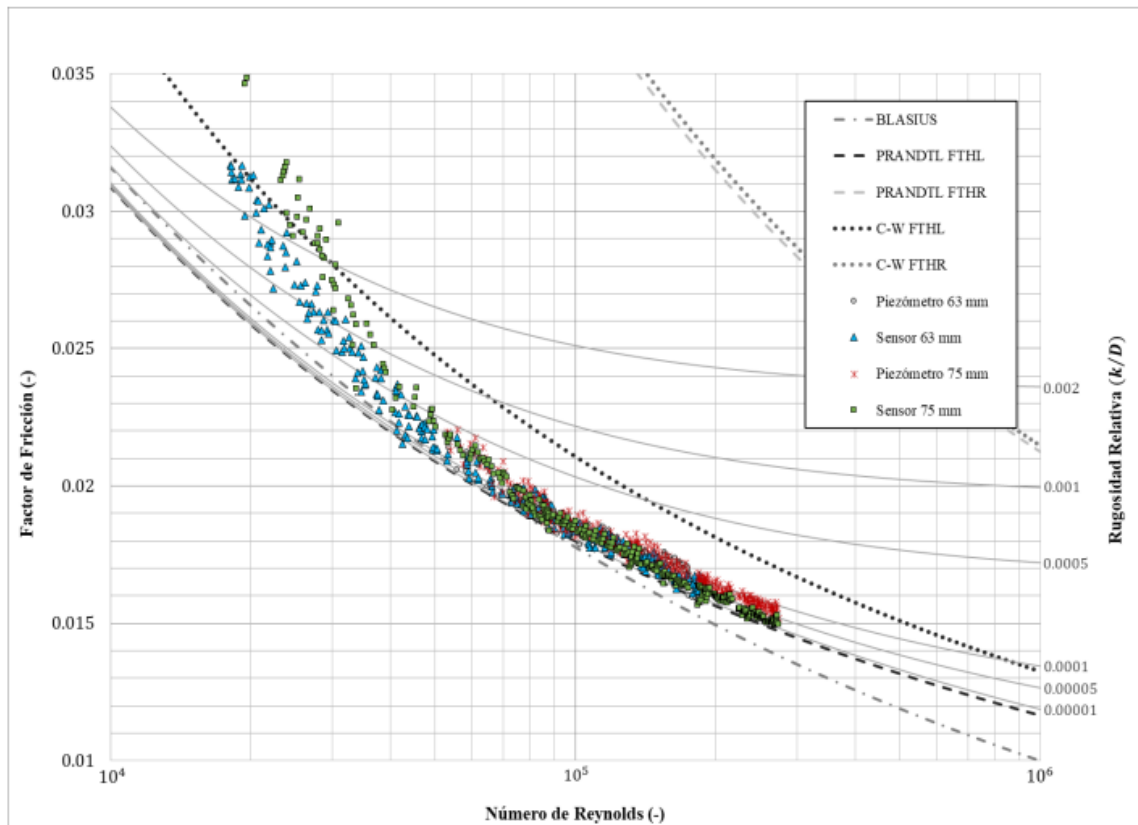


Figura 4. Diagrama de Moody para tuberías con diámetro de 63 mm y 75 mm.

En la figura (5) y (6) se muestran los resultados obtenidos para los ensayos realizados por Daniel Hernández:

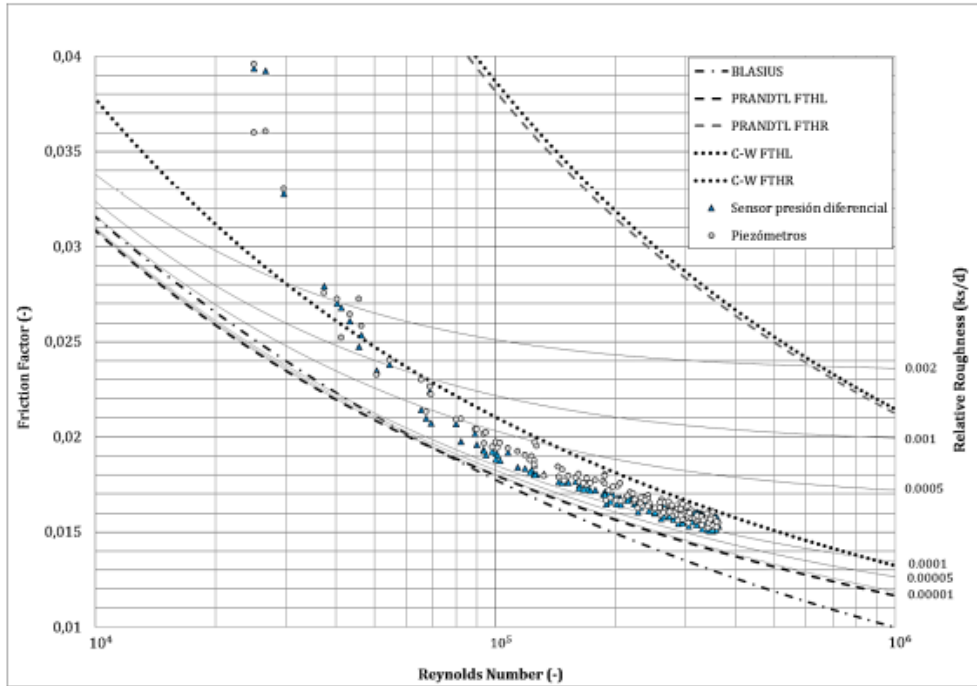


Figura 5. Diagrama de Moody para diámetros de 139.98 mm.

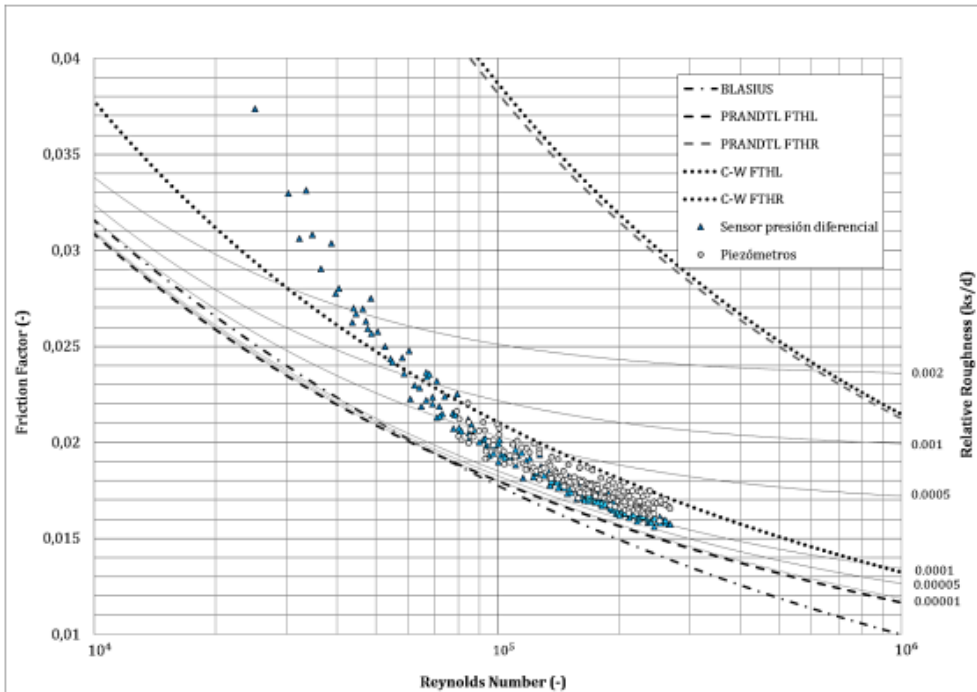


Figura 6. Diagrama de Moody para la tubería con diámetro de 71.71 mm.

En la figura (4) se puede observar que el sensor logra captar las pérdidas por fricción para caudales menores, también se observa que, los valores tomados se ajustan más a las ecuaciones delimitantes cuando se toman datos para números de Reynolds superiores a 50000, para estos dos ensayos la ecuación de Blasius y la ecuación de Colebrook-White (FLTHL) se ajustan a los resultados obtenidos. Por otro lado, se puede evidenciar que el sensor toma datos con una leve diferencia menor que los mostrados por el piezómetro de mercurio. En la figura (5) y (6) se puede observar que existe alguna dispersión entre los datos obtenidos por el sensor y los piezómetros, para ambos casos los datos leídos en los piezómetros son superiores que arrojados por el sensor, para estos dos ensayos, los datos obtenidos se encuentran en el rango existente entre las ecuaciones de Prandtl von Kármán y la ecuación de Colebrook-White y más alejados de la ecuación de Blasius. En la figura (5) y (6) también se puede observar los datos tienen a ser mayor exactos y agrupados para números de Reynolds superior a 100000 y 90000 respectivamente.

En la figura (7) se encuentran los resultados para el ensayo 5 y en la figura (8) se encuentran los del ensayo 6:

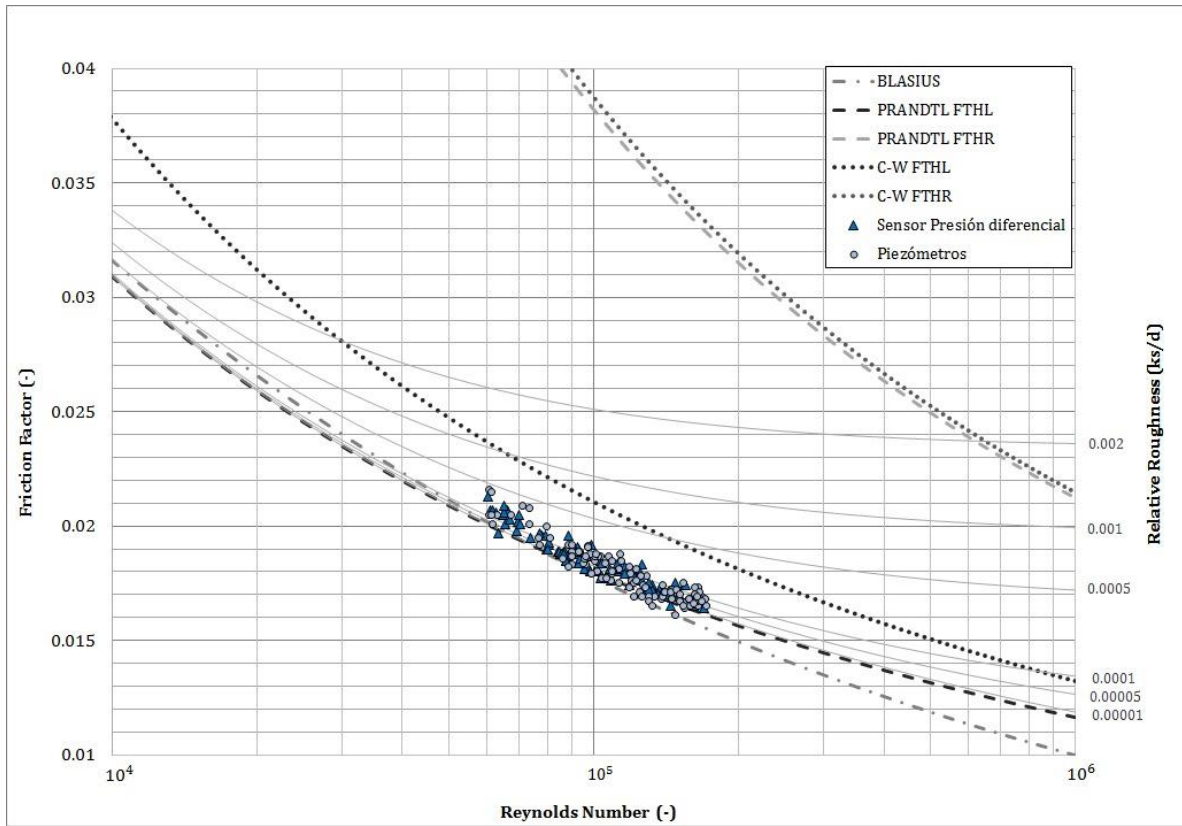


Figura 7. Diagrama de Moody para tubería de diámetro nominal de 63 mm.

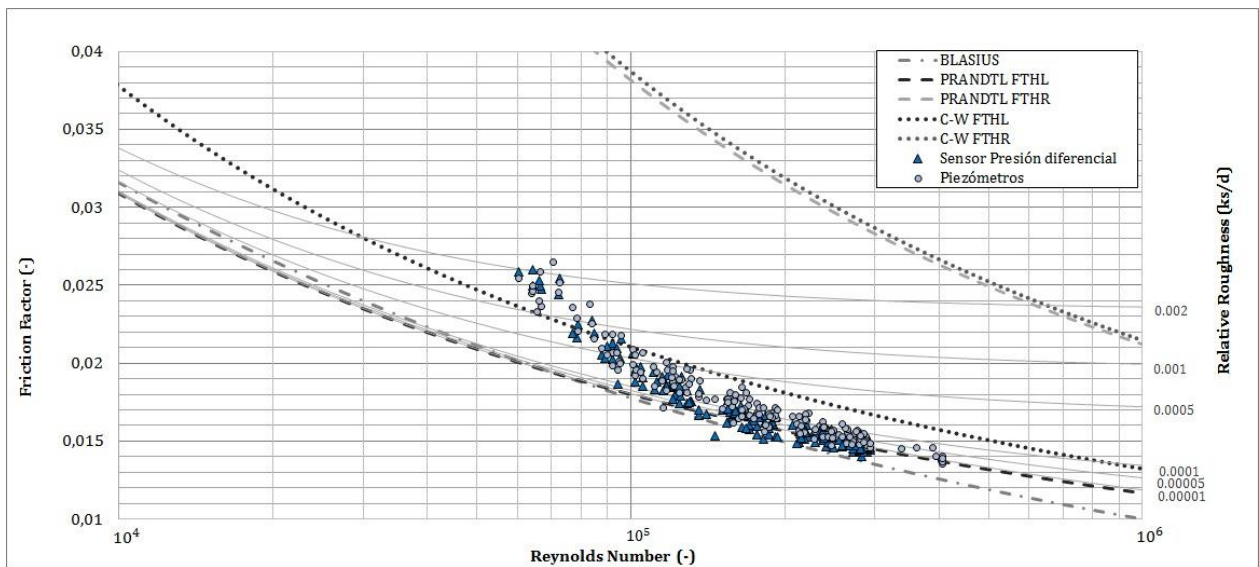


Figura 8. Diagrama de Moody para tubería con diámetro nominal de 90 mm.

En la figura (7) se puede observar que los valores obtenidos se ajustan a la ecuación de Blasius y de Colebrook-White y no están tan cerca de la ecuación de Colebrook-White. También se

puede determinar que la diferencia entre los datos arrojados por el sensor y los piezómetros no es tan perceptible, es decir, no existe una percepción considerable. Para esta tubería se manejaron los caudales que existen principalmente en los sistemas de distribución de agua potable, no menores a 2 l/s. En la figura (8) se puede observar que los datos arrojados por el sensor tienden a acercarse a la ecuación de Blasius y Colebrook-White, por otro lado, los datos del piezómetros están en el rango delimitado por la ecuación de Blasius y la ecuación de Prandtl von Kármán. También se puede observar que a mayores caudales (10 m/s) los datos poseen menor dispersión.

En general se puede determinar que a menores caudales las ecuaciones van a ajustarse a la ecuación de Prandtl von Kármán, aunque con caudales demasiado pequeños los valores obtenidos no se ajustan a las ecuaciones existentes. Sin embargo, dentro de lo establecido esto no representa mayor problema, debido a que en sistemas de distribución de agua potable no se manejan caudales pequeños, por el contrario caudales principalmente grandes. Por otro lado, a caudales mayores testados las ecuaciones de Blasius y Colebrook-White son aquellos a que los ensayos se ajustan. Por último, se puede observar que los resultados obtenidos concuerdan con y son acordes con los obtenidos con la investigación realizada por la universidad de los Andes para el material del PVC.

Conclusiones

Con las nuevas tecnologías y la introducción de nuevos materiales en los sistemas tradicionales de infraestructura es importante realizar estudios para garantizar la aplicabilidad de las ecuaciones con las que se diseña. El polietileno es un termoplástico que dada sus ventajas cada vez es mas comercial y popular en el uso de sistemas de drenaje, este material frente a antiguos es mas liso. Con los ensayos realizados es posible garantizar que dentro de las tuberías de polietileno existe flujo hidráulicamente liso y que se encuentra dentro de lo establecido para las redes de distribución secundarias, y los límites que se establecieron por las ecuaciones propuestas inicialmente. Se puede concluir que la ecuación de Prandtl von Kármán es más adecuada al describir caudales pequeños, y que la ecuación de Colebrook-White se ajusta a caudales mayores. Es importante mencionar que, la

ecuación de Prandtl von Kármán no tiene en cuenta el coeficiente de rugosidad, para estos caudales menores el coeficiente de rugosidad se vuelve irrelevante en el diseño de las tuberías y no afecta al factor de fricción encontrado. Las ecuaciones tradicionales utilizadas aunque fueron desarrolladas para materiales mas rugosos, tiene buena adaptabilidad con materiales lisos como polietileno y permiten obtener una buena aproximación del factor de fricción. Es importante seguir realizando estudios que permitan conocer el comportamiento del fluido dentro de las redes de distribución de agua potable, y así con el desarrollo de las tecnologías se logre optimizar el funcionamiento de estas.

Referencias

Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G., & Pumo, D. (1995). Experimental Study on Flow-Resistance Law for Small-Diameter Plastic Pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.

Bernuth, R. D. von, and Tonya Wilson. 1989. "Friction Factors for Small Diameter Plastic Pipes." *Journal of Hydraulic Engineering* 115 (2): 183–92. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1989\)115:2\(183\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:2(183)).

Cardoso, G. G. G., Frizzone, J. A., & Rezende, R. (2008). Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 30, 299-305.

Diogo, A. F., & Vileta, F. A. (2014). Head Losses and friction factors os steady turbulent flows in plastic pipes. *Urban Water Journal*. doi:10.1080/1573062X.2013.768682

Jones, F. E., & Harris, G. L. (1992). ITS-90 Density of Water Formulation for Volumetric Standards Calibration. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. Obtenido de https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/097/jresv97n3p335_A1b.pdf

Hernández Murcia, D. A. (2018) Modelación física del flujo turbulento hidráulicamente liso en tuberías largas de polietileno. Universidad de los Andes.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. 2010. Título B. Sistemas de Acueducto. Reglamento Técnico Del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. 2nd ed. Bogotá. [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/Vice ministerio Agua/TITULO B 030714.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/Vice%20ministerio%20Agua/TITULO%20B%20030714.pdf).

Naranjo, E. A. (2018). Modelación Física del Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso en Tuberías Largas de Polietileno. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.

Norum, E. M. (1984). Determining friction loss in polyethylene pipe used for drip irrigation laterals. *Irrigation Age*, 26 k 17-18

Paraqueima, J. R. (1977). Study of some frictional characteristics of small diameter tubing for trickle irrigation laterals. Thesis (MSc). Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University.

Saldarriaga, J. G. (2016). Hidráulica de Tuberías - Abastecimiento de agua, redes y riegos (Tercera ed.). Bogotá, Colombia: Alfaomega.

Urbina, J. L. (1976). *Head loss characteristic of trickle irrigation hose with emitters* (Doctoral dissertation, Utah State University. Department of Agricultural and Irrigation Engineering.)